



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LASSI KESKINEN  
POLYMEERIPOHJAISEN PALO-OVEN RAKENTEEEN OPTIMOINTI  
Diplomityö

Tarkastajat: Professori Jyrki  
Vuorinen ja TkT Essi Sarlin  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-  
voston kokouksessa 12. elokuuta  
2015

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

**KESKINEN, LASSI:** Polymeeripohjaisen palo-oven rakenteen optimointi

Diplomityö, 72 sivua, 1 liitesivu

Elokuu 2015

Pääaine: Tekniset polymeerimateriaalit

Tarkastajat: Professori Jyrki Vuorinen, TkT Essi Sarlin

Avainsanat: Palo-ovi, palonkesto, ääneneristys, äänenabsorptio, lämmönjohtuminen, polttokoe, polymeerien palonesto

Polymeeripohjaiset palo-ovet ovat ovia, jotka pystyvät rajaamaan paloa yhdessä ovea ympäröivän seinän kanssa. Työn tavoitteena oli löytää uusi palo-ovirakenne jolla saavutettaisiin referenssimateriaalia paremmat palonkesto-ominaisuudet, ääneneristysominaisuudet, mekaaniset ominaisuudet sekä pinnanlaatu.

Polymeeriset palo-ovet koostuvat usein ulkoisesta kuitulujitetusta polymeerisestä pintakerroksesta, joka antaa ovelle sen ulkonäön sekä kulumisen, kosteuden ja kemikaalien keston. Oven sisus on yleensä keraaminen levy, jonka tehtävänä on toimia lämmön- ja ääneneristeenä sekä antaa ovelle sen vaatimat mekaaniset ominaisuudet.

Palo-ovien palonkesto-ominaisuuksia testataan standardoiduilla polttokammiokokeilla, joiden aikana palo-ovi altistetaan toispuoleiselle palolle. Standardien mukaiset polttokammiokoeket pyrkivät simuloimaan huonepalon oveen aiheuttamaa lämpökuormaa määrittelemällä polttokammion lämpötilannousun ajan suhteen sekä paineen oven korkeuden suhteen. Polttokammiokokeissa voi kammion lämpötila nousta yli 1000 °C:een. Kokeiden aikana oven kylmän puolen pinnasta mitataan lämpötilaa, mikä ei saa nousta standardien asettamien rajojen yläpuolelle.

Tässä työssä valittiin kahdeksan eri oven sisusmateriaalia esitesteihin, missä testattiin materiaalien puristuslujuutta, taivutuslujuutta, kovuutta, äänen absorptiota sekä lämmöneristyskykyä. Näiden kokeiden perusteella valittiin kaksi materiaalivaihtoehtoa suuren mittakaavan testeihin, missä näitä materiaaleja käyttäen valmistettiin täysikokoiset ovet, joiden ääneneristyskyky (ISO 717-1) ja palonkesto-ominaisuudet (EN 1363-1) mitattiin.

Työn tuloksena saatiin uusi palo-ovirakenne, jonka palonkesto parani referenssirakenteeseen verrattuna noin 100 %, mekaaniset ominaisuudet paranivat 4-8 kertaiseksi ja äänenläpäisevyys laski 50 %. Samalla oven pinnanlaatu säilyi samana tai parani. Tämän oven valmistaminen vaatii kuitenkin uuden ylimääräisen työvaiheen, minkä vuoksi tuote vaatii vielä kehitystyötä. Optimoimalla raaka-aineet sekä työprosessit voidaan tuotteen valmistus- ja raaka-ainekustannukset pitää kurissa.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Engineering

**KESKINEN, LASSI:** Optimizing the structure of a polymeric fire proof door

Master of Science Thesis, 72 pages, 1 Appendix page

August 2015

Major: Technical polymer materials

Examiner: Professor Jyrki Vuorinen, Dr. (Tech.) Essi Sarlin

Keywords: Fire door, fire resistant doors, sound absorption, sound insulation, thermal transmittance, fire resistance testing, fire resistance of polymers

Polymeric fire proof doors are used in buildings in conjunction with the surrounding walls to limit and confine building fires within a certain area. The aim of this thesis was to develop a new polymeric fire proof door material, which would deliver better thermal and acoustical performance as well as improved mechanical properties and surface quality.

Polymeric fire proof doors usually consist of an external fiber reinforced polymer layer, which gives the door its visual appearance, wear resistance, humidity resistance and chemical resistance. The interior layer of the door usually is a ceramic panel, which provides thermal and acoustical insulation as well as mechanical strength.

The fire resistance properties of polymeric fire proof doors are measured using standardized furnace tests, where a door is subjected to a one-sided simulated fire. The temperature and pressure within the furnace are aimed to represent a typical fire within a building. The temperatures within the furnace can reach up to more than 1000 °C. At the same time the temperature rise of the fire door is measured from the other side. The temperature rise must remain under the limits set by the standards.

Eight different interior panel materials were investigated in this thesis. Compressive strength, bending strength, surface hardness, sound absorption and thermal insulation were investigated during the preliminary tests. Two materials were selected for full scale testing based on the tests results from the preliminary tests. Two full scale doors were produced and their sound insulation (ISO 717-1) and fire resistance (EN 1363-1) were tested.

As a result, a new polymeric fire proof door was created with 100% better fire resistance, 4-8 times better mechanical properties while maintaining or improving surface quality. In addition the sound transmittance decreased by 50%. However, the door requires an additional production phase. We can keep production and material costs down if we can optimize raw material usage and work flow.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin syksyn 2014 ja kevään 2015 välisenä aikana Tampereen teknillisen yliopiston materiaalitekniikan laitoksen tiloissa. Haluan kiittää työn ohjaajaa Essi Sarlinia suuresti avusta ja siitä, että häneltä sai aina tarvittaessa uusia näkökulmia ja neuvoja. Myös työn tarkastaja Jyrki Vuorinen antoi työn alkuvaiheella tärkeitä vinkkejä ja ajatuksia työn rakenteeseen liittyen. Myös TTY:n keraamiryhmän tutkijoilta Arnold Ismailovilta ja Saara Heinoselta sain tukea työn teoriaosuuteen liittyen.

Haluan myös kiittää läheisiä ja ystäviä, jotka auttoivat välillä siirtämään ajatukset muihin asioihin. Ilman heidän apuaan olisi työtaakka ollut moninverroin raskaampi.

Tampereella, 26.05.2015

Lassi Keskinen

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Palonkestävät ovirakenteet .....	2
2.1	Palo-ovien yleiset vaatimukset .....	2
2.1.1	Mekaaniset ominaisuudet .....	2
2.1.2	Ääneneristys .....	4
2.1.3	Lämmöneristys .....	15
2.2	Palo-ovien rakenne .....	19
2.2.1	Pintamateriaalit .....	20
2.2.2	Ydinaiho .....	23
2.2.3	Palotiivisteet .....	28
3	Polymeerien palaminen.....	30
3.1	Polymeerien palon vaiheet .....	32
3.2	Palotestaus ja -luokitukset .....	37
3.2.1	LOI-indeksi.....	37
3.2.2	UL 94 -luokitus .....	38
3.2.3	Kartiokalorimetri .....	40
4	Polymeerien palonesto .....	41
4.1	Fysikaalinen palonesto .....	42
4.2	Kemiallinen palonesto .....	42
4.3	Palonestolisäaineet .....	42
4.3.1	Mineraalit .....	43
4.3.2	Halogenoidut palonestoaineet .....	44
4.3.3	Fosfori-pohjaiset palonestoaineet .....	45
4.3.4	Tyypipohjaiset palonestoaineet .....	46
4.3.5	Piipohjaiset palonestoaineet .....	46
4.3.6	Nano-kokoluokan palonestoaineet .....	47
4.4	Palonestoaineiden synergiaetuja.....	50
5	Kokeellinen osuus.....	51
5.1	Pintamateriaalit.....	51
5.2	Oven sisäinen rakenne .....	53
5.3	Esikarsintatestit .....	55
5.3.1	Lämmöneristysominaisuudet.....	55
5.3.2	Puristuslujuus .....	58
5.3.3	Taivutuslujuus .....	59
5.3.4	Kovuus.....	61
5.3.5	Äänenabsorptiokyky.....	61
5.4	Suuren mittakaavan testit .....	64
5.4.1	Näytteen valmistus .....	64
5.4.2	Pinnanlaatu .....	64
5.4.3	Ääneneristävyys (ISO 717-1: 2013).....	65

5.4.4 Polttokoe (EN 1363-1:2012) .....	66
5.5 Yhteenveto.....	70
6 Johtopäätökset.....	71
Lähteet.....	73
Liitteet .....	79

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

A	Vastaanottohuoneen absorptioala ilmaääneneristysmittauksessa
a	Nelipistetaivutuksessa alatuen ja sitä lähinnä olevan yläpainimen etäisyys toisistaan
ABS	Akryyliniitriilibutadieenistyreeni
$\alpha$	Absorptiosuhde
ASTM	Kansainvälinen standardoimisjärjestö (American Society for Testing and Materials)
B	Taivutusjäykkyys
b	Kappaleen leveys
BS	Brittiläinen standardi (British Standard)
c	Äänennopeus
d	Näytteen paksuus
$d_v$	Vickersin kovuusmittauksessa näytteen pintaan syntyneen painauman halkaisijan aritmeettinen keskiarvo
E	Standardin SFS-EN 13501-2 määrittelemä rakenteen tiiveys
EU	Euroopan Unioni
$E_Y$	Youngin moduuli
$\eta$	Häviökerroin
$\eta_{\text{int}}$	Materiaalin sisäinen häviökerroin
EN	Eurooppalainen standardi
EVA	Etyylivinyylisasetaatti
F	Voima
f	Äänentaajuus
$f_c$	Koinsidenssin rajataajuus
$f_{11}$	Rakenteen alin ominaistaajuus
$f_h$	Leikkausaaltoalueen rajataajuus
$f_{\text{mam}}$	Kaksinkertaisen rakenteen ominaistaajuus eli massa-jousi-massajärjestelmän ominaistaajuus
GB	Kiinalainen kansallinen standardi (Guobiao standards)
h	Kappaleen paksuus
H	Lämpövirta
HIPS	High Impact Polystyrene, korkean iskulujuuden polystyreeni
HDPE	High Density Polyethylene eli korkean tiheyden polyeteeni
I	Standardin SFS-EN 13501-2 määrittelemä rakenteen eristävyys
ISO	Kansainvälinen standardoimisjärjestö (International Organization for Standardization)
k	Lämmönjohtavuus

L	Äänenpainetaso
LDPE	Low Density Polyethylene eli matalan tiheyden polyeteeni
LOI	Standardien ISO 4589 ja ASTM D2863 mukaisesti määriteltä pienin hapen konsentraatio, jolla polymeeri ylläpitää palamista (Limiting Oxygen Index)
$m'$	Neliömassa
p	Mitattu äänenpaine
PA	Polyamidi
PAI	Polyamidi-imidi
PBDE	Polybromodifenyylietteri
PC	Polykarbonaatti
PEEK	Polyeetterieetteriketoni
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti
PP	Polypropyleeni
PS	Polystyreeni
PTFE	Polytetrafluorieteeni
PVC	Polyvinyylikloridi
PVdC	Polyvinyyliideenikloridi
Q	Lämpömäärä
R	Ilmaääneneristävyys
$R_t$	Terminen resistiivisyys
$R_w$	Ilmaääneneristävyysluku
r	Heijastuskerroin
$\rho$	Tiheys
S	Pinta-ala
s	Impedanssiputkeen syntynyt seisovan aallon suhde
SFS	Suomen Standardoimisliitto ry
$\sigma$	Jännitys
$\sigma_f$	Taivutusjännitys
T	Lämpötila
t	Aika
TBBPA	Tetrabromobisfenoli
U	Konduktanssi
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene eli erittäin korkean molekyylipainon polyeteeni
UL	Yhdysvaltalainen turvallisuuskonsultointi- ja sertifiointiyritys (Underwriters Laboratories)
$\nu$	Poissonin vakio
W	Ääniteho



# 1 JOHDANTO

Suomessa syttyy vuosittain noin 6000-7000 rakennuspaloa, joista aiheutuu noin 300 miljoonan euron vahingot [1, 2]. Suomessa kuolee vuosittain noin 100 ihmistä rakennuspaloissa, mikä on väkilukuun suhteutettuna Euroopan keskiarvoa selkeästi enemmän; noin kaksi ihmistä 100 000 asukasta kohti [1]. Näistä kuolemista noin 80% sattuu tilanteissa, missä uhri ei kykene poistumaan palopaikalta.

Palonkestävät ovet ovat palotilanteessa ensiarvoisen tärkeitä, jotta palon leviämistä voidaan hillitä ja täten antaa aikaa rakennuksen evakuointiin ja rakennuksen sammutustöille. Palo-ovet suunnitellaan siten, että ne pysyvät karneissaan suunnitellun ajan muotoonsa merkittävästi muuttamatta, syttymättä ja liikaa lämpenemättä. Tämä ehkäisee muun muassa lämmön, liekkien ja palokaasujen leviämistä ja siten palo-ovet ehkäisevät ylimääräisten materiaalivahinkojen syntymistä.

Palo-ovien paloneristysominaisuuksia mitataan standardoiduilla polttokammiokokeilla. Standardien tiukentuminen vaatii yhä uusien palo-ovimateriaalien ja -rakenteiden etsimistä. Tämän työn tavoitteena on löytää uusi, kaupallisesti tuotantokelpoinen palo-ovirakenne, jolla saavutetaan aiempaa parempi palonkesto.

Tämä työn teoreettisessa osassa perehdytään ensin palonkestävien ovien mekaanisiin, akustisiin ja termisiin vaatimuksiin ja pyritään löytämään yhteys materiaaliominaisuuksien ja tuotteen ominaisuuksien välille. Työssä käsitellään mekaanisten ominaisuuksien, ääneneneristysten ja lämmöneristysten teoriaa. Tämän jälkeen käsitellään palo-ovien rakennetta ja rakenteen vaikutusta oven eri ominaisuuksiin. Lopuksi keskitytään polymeerien palo-ominaisuuksiin, esitellään niiden testaamiseen käytetyt yleisimmät menetelmät ja käydään läpi yleisimmät polymeerien palonestolisäaineet.

Työn kokeellisessa osassa valitaan teoriaosuuden pohjalta yhteensä kahdeksan materiaalia, mekaanisiin, akustisiin ja lämmöneristysmittauksiin. Mekaanisiin testeihin kuuluu puristus- ja taivutuslujuusmittaukset sekä kovuusmittaukset. Akustisia ominaisuuksia mitataan äänenabsorptiomittauksella. Materiaalien lämpötilankestoa ja lämmöneristyskykyä mitataan korkeaan lämpötilaan nousevan uunin avulla. Näiden esitestien pohjalta valitaan kaksi materiaalia suuren mittakaavan kokeisiin, joissa testattiin uusista materiaalivaihtoehdoista valmistetuista ovista ääneneneristyskyky (ISO 717-1) ja palonkestokyky (EN 1363-1). Työn lopussa esitetään tiivistelmä työn tuloksista ja uudella rakenteella saavutettavista hyödyistä.

## 2 PALONKESTÄVÄT OVIRAKENTEET

Palonkestävien ovien tavoitteena on rajata paloa yhdessä ovea ympäröivän rakenteen kanssa. Yleisesti palo-ovet noudattavat paloluokituksestaan niinkutsuttua  $\frac{3}{4}$ -sääntöä [3, s. 107-118], jonka mukaan ovien paloluokitus tulee olla vähintään  $\frac{3}{4}$  ovea ympäröivän seinän paloluokituksesta. Seinien paloluokitus tarkoittaa aikaa, kuinka kauan seinä pystyy rajaamaan tulta ja savua. Esimerkiksi neljän tunnin paloluokituksen seinä vaatii kolmen tunnin paloluokituksen oven.

### 2.1 Palo-ovien yleiset vaatimukset

Palo-oven tulee kestää mitoituksesta ja paloturvallisuusluokasta riippuen tyypillisesti 30-180 minuuttiin toispuoleista paloa ilman että oven vastapuolen lämpötila kasvaa valittujen standardien määrittelemiä rajoja suuremmaksi. Oven tulee myös pysyä paikallaan ja tiivistää oviaukko yhdessä ovenkarmien kanssa.

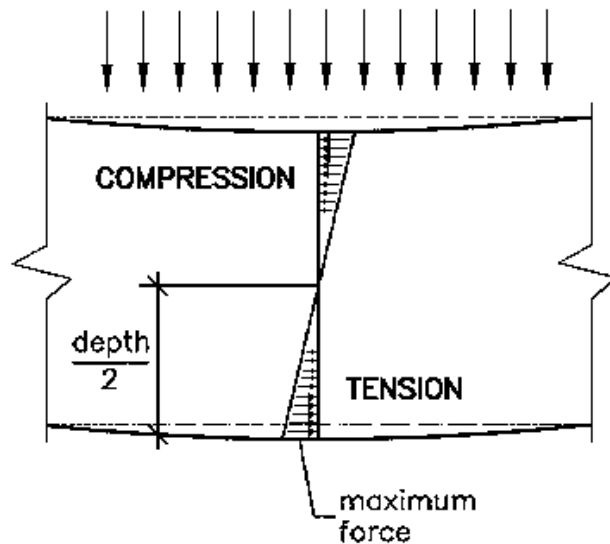
Palo-ovien muiden ominaisuuksien, kuten mekaanisten ominaisuuksien tai äänneneristävyyssominaisuuksien tulee myös olla riittävällä tasolla. Perinteisten ovien tavoin palo-ovien tulee myös kestää mekaanista kuormitusta, kulutusta ja iskuja, absorboida ääntä sekä olla kevyt. Palo-ovien pintojen tulee olla hyvälaatuisia ja mielellään pintakuvioinniltaan räätälöitävissä, eikä pinnanlaatu saa ajan myötä muuttua esimerkiksi UV-valon vaikutuksesta.

#### 2.1.1 Mekaaniset ominaisuudet

Oven elinkaaren aikana ovi altistuu monille erilaisille mekaanisille kuormille. Valmistuksen aikana oven tulee kestää puristusta ja taivutusta. Asennuksen yhteydessä oveen voi kohdistua pistekuormia, vääntöä ja taivutusta. Käytön aikana oven pinta altistuu kulutukselle, kemikaaleille ja iskuille. Palotilanteessa oven tulee tiivistää oviaukko palon leviämisen estämiseksi ja palokaasujen pysäyttämiseksi mahdollisimman pitkään. Tämä vaatii ovelta mekaanista lujuutta myös korotetuissa lämpötiloissa. Polymeerisen oven pinnanlaatuun vaikuttaa oven ydinaihion kovuus.

Tässä työssä tutkitun polymeerisen palo-oven valmistusmenetelmästä tunnetaan oveen aiheutuneet keskimääräiset kuormat. Oven valmistusprosessissa syntyy oveen puristusjännitys, jonka suuruus on alle 2,5 MPa. Oven puristuslujuuden tulee siis olla vähintään 2,5 MPa kestääkseen valmistuksessa aiheutunut puristusaine. Oveen muodostuu lisäksi erilaisia taivutusjännityksiä valmistuksen ja käytön yhteydessä. Taivutusjännityksessä olevaan kappaleeseen syntyy rakenteen ulkopinnoille puristus- tai vetojännitys kuvan 2.1 mukaisesti. Kappaleen keskiosaan muodostuu leikkausjännitys.

Materiaalin puristus- ja vetolujuudet sekä leikkauslujuus ovat keskeisiä tekijöitä levymäisen rakenteen taivutuslujuuden määrittämisessä. Mikäli rakenne koostuu useammasta osasta muodostaen kerroslevyrakenteen, kantavat pintakerrokset veto- ja puristusjännityksen, kun taas ydinkerrokseen kohdistuu pääasiassa leikkausvoimia [4]. Taivutuslujuudet voivat vaihdella eri materiaaliryhmien välillä paljonkin. Esimerkiksi keraamimateriaalien vetolujuus on usein paljon niiden puristuslujuutta matalampi [5]. Tällöin rakenne murtuu, kun vetolujuuden arvo ylittyy.



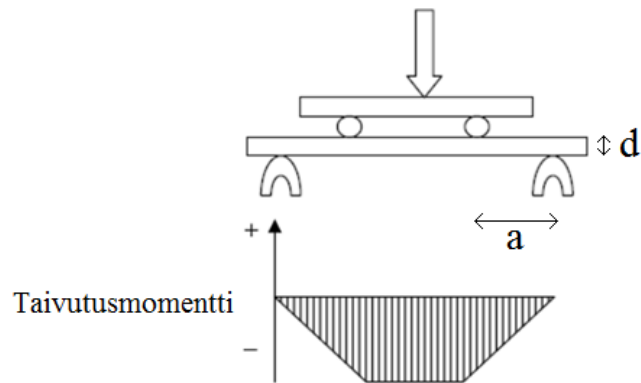
**Kuva 2.1.** Taivutuksessa rakenteeseen kohdistuva puristus- (compression) ja vetojännitys (tension) rakenteen paksuuden funktiona. [6]

Oven taivutuslujuutta voidaan mitata standardin ISO 14704:2008 mukaisen nelipistetäivutuskokeen avulla, missä mitattava suorakaiteen muotoinen kappale tuetaan reunoiltaan alapuolelta rullamaisilla tuilla, jonka jälkeen näytettä kuormitetaan yläpuolelta kuormituspäällä, missä on kaksi kuormituspistettä. Näiden kahden näytteen yläpuolella sijaitsevan kuormituspisteen väliin syntyy tasainen taivutusmomentti kuvan 2.2 mukaisesti. Näytteen tulisi siis murtua tällä alueella, mikäli rakenteessa ei ole kriittisiä virheitä.

Mittauksessa mitataan yläpainimen näytteeseen aiheuttamaa voimaa. Näytteen taivutuslujuus voidaan laskea kaavalla

$$\sigma_f = \frac{3Fa}{bd^2} \quad (1)$$

missä  $\sigma_f$  on taivutuslujuus [MPa],  $F$  yläpainimesta mitattu voima [N],  $a$  toisen alatuen ja sitä lähinnä olevan kuormituspään etäisyys [mm],  $b$  näytteen leveys [mm] ja  $d$  näytteen paksuus kuormitussuunnassa mitattuna [mm] [8]. Aiempien havaintojen perusteella tiedetään, että ydinaihion taivutuslujuuden tulee olla vähintään 0,8 MPa käytössä ja valmistuksessa aiheutuneiden taivutusten ja vääntöjen kestämiseksi.



**Kuva 2.2.** Nelipistetaivutuskokeen mittausjärjestely ja mittauksessa kappaleeseen aiheutettu taivutusmomenttikuvaaja. Kuvaan on lisätty lisäksi kaavassa (1) esiintyvät mitat  $a$  ja  $d$ . Muokattu lähteestä [7]

Polymeerisen oven, jonka pintaan jäävän polymeerikerroksen lujittamiseen on käytetty lasikuitua, pinnanlaatuun vaikuttaa ydinaihion kovuus. Valmistusprosessissa oveen kohdistuu puristusjännitys, jolloin lasikuidut painautuvat oven ydinaihiota päin. Mikäli tämä ei anna lainkaan periksi, eivät lasikuidut pysty muodostamaan tasaista pintaa oven ulkopinnalle, vaan valmiin oven pinnassa näkyy yksittäisten lasikuitujen aiheuttamaa epätasaisuutta. Tämän vuoksi oven ydinmateriaalin kovuus ei saa olla liian suuri.

Oven pintamateriaalin kulumisenkestoon vaikuttaa pääasiassa pinnan kovuus. Pinnan eroosioon vaikuttaa kovuuden lisäksi myös pinnan sitkeys ja pintaan osuvien partikkeleiden tulokulma ja nopeus. Pinnan lommoontumisherkkyteen vaikuttaa kovuus ja elastisuus. Pintamateriaalin valinta ja sen pintakäsittely ja mahdollinen tekstuuri myös vaikuttavat kolhujen ja kulumisen havaittavuuteen.

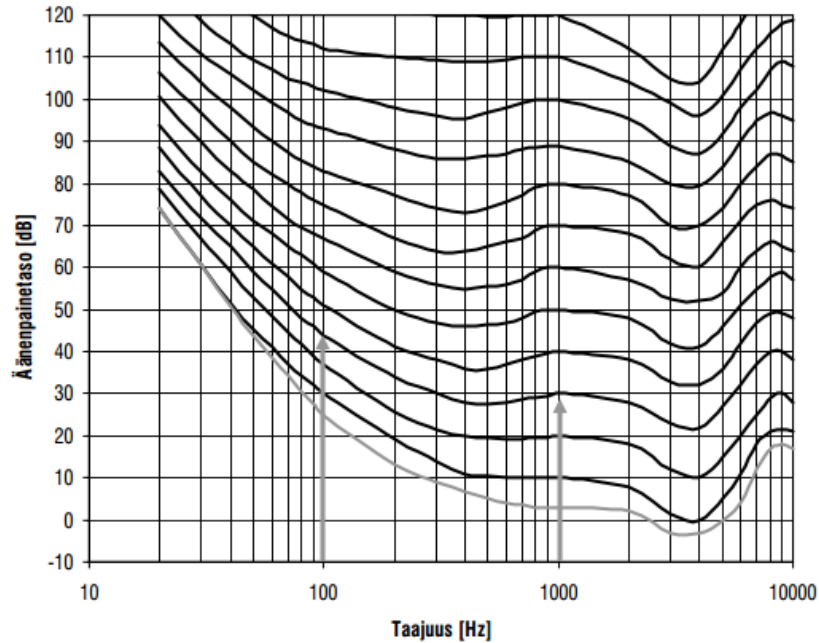
Palotilanteessa oven mekaaniset ominaisuudet tulee säilyä riittävän korkeina, jotta palon rajaaminen on mahdollista. Tämä tarkoittaa sitä, että ovelle käytetyt materiaalikombinaatiot eivät saa muuttua mekaanisilta ominaisuuksiltaan merkittävästi korkeissa lämpötiloissa. Korkeassa lämpötilassa tapahtuvat materiaalimuutokset pitää ottaa suunnitteluvaiheessa huomioon, kuten esimerkiksi oven polymeerisen pintakerroksen pois palaminen. Tässä tilanteessa oveen kohdistuvat kuormat jäävät kokonaan ydinaihion kannettavaksi. Palon jälkeisiä mekaanisia ominaisuuksia voidaan mitata vesisuihkulla standardin ASTM 119E mukaisesti.

### 2.1.2 Ääneneristys

Ääneneristyksellä tarkoitetaan äänilähteen ja äänen havaitsijan välillä tapahtuvaa tarkoituksellista äänenpainetason alenemaa. Tavoitteena on eristää häiritsevä, haitallinen tai ei-toivottu ääni kuulijasta. Häiritsevä ääni voi olla ympäristöstä selvästi erottuvaa tai poikkeavaa ääntä tai se sisältää tarpeetonta tai ei-toivottua informaatiota [9, s. 13-14].

Ihmiskorva aistii ilmanpaineen vaihtelua taajuusvälillä 20 – 20000 Hz ja ihmisen puhe jää yleensä välille 85-255 Hz. Ihmisen korvan herkkyys äänelle riippuu kuitenkin

äänen taajuudesta (kuva 2.3) ja häiritsevästä koettu melu on lisäksi subjektiivinen käsite. Rakennuksissa tilojen välille asennettavien ovien tarkoituksena on toimia näkö- ja kulkuesteiden lisäksi kuuloesteinä. Palo-ovien suunnittelussa ääneneristys on perinteisiin oviin nähden yhtä tärkeässä asemassa, jotta ei-toivottu melu voidaan eristää.



**Kuva 2.3.** Äänen voimakkuuden kokeminen eri äänentaajuuksilla. Vakioäänekkyyyskäyrät kuvaavat vaadittua äänen voimakkuutta eri taajuuksilla, jotta ihmiskorva kokee äänen yhtä voimakkaana. Alin käyrä osoittaa kuulokynnyksen eri taajuuksilla. [9, s. 15]

Äänenpainetasomittauksissa hyödynnetään äänispektrin jakamista pienempiin osiin eli taajuuskaistoihin, sillä äänilähteiden tuottamalla äänellä on eri äänenpainetaso eri äänentaajuuksilla. Tämän avulla äänenmittauksesta saadaan tarkempaa tietoa. Yleisesti taajuuskaistoina käytetään oktaavikaistoja tai kolmannesoktaavikaistoja. Näiltä kaistanleveyksiltä mitattu ääni sisältyy tietyllä taajuuskaistalla ilmoitettuun äänenpainetasoon. Tarkempaa tietoa äänestä saa mittaamalla kolmannesoktaavikaistoja. Liitteessä 1 esitellään eri oktaavi- sekä kolmannesoktaavikaistojen taajuusalueet. Eri laitteiden ja materiaalien ominaisuudet ilmoitetaan nykyään käyttäen keskitaajuuksia 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ja 4000 Hz.

Ilmaääneneristävyydellä tarkoitetaan oven, seinän tai muun esteen kykyä estää äänen kulkeutumista eri huonetilojen välillä. Ilmaääneneristävyys  $R$  [dB] on rakenteeseen kohdistetun äänitehon  $W_1$  ja sen toiselle puolelle siirtyneen äänitehon  $W_2$  suhde [9, s. 47]:

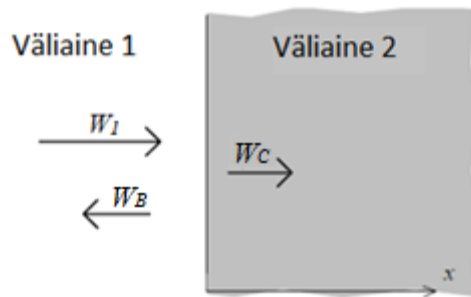
$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \quad (2)$$

Ilmaääneneristävyys riippuu muun muassa äänentaajuudesta, eristävästä rakenteesta sekä rakenteessa käytetyistä materiaaleista.

Ääniaalto voi rakenteeseen osuessaan joko heijastua rakenteen pinnasta tai absorboitua rakenteeseen. Absorption ja heijastumisen suhdetta kuvaa absorptiosuhde  $\alpha$  [9, s. 37]:

$$\alpha = 1 - \frac{W_B}{W_I} \quad (3)$$

missä  $W_I$  on materiaalin pinnan kohdannut ääniteho ja  $W_B$  on pinnasta heijastunut ääniteho. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 2.4. Pinnasta heijastumatta jäänyt ääniteho  $W_C$  absorboituu rakenteeseen ja muuttuu lämmöksi tai johtaa rakenteen värähtelyyn.



**Kuva 2.4.** Rakenteeseen osunut ääniaalto  $W_I$  ja siitä heijastunut ääniaalto  $W_B$ . Rakenteeseen absorboitunut ääniaalto  $W_C$  siirtyy rakenteen sisällä ja vaimenee edetessään. Muokattu lähteestä [10, s. 208; katso 11]

Korkean absorptiosuhteen omaava materiaali kykenee vastaanottamaan siihen osuneen ääniaallon. Kyseessä on yleensä jokin huokoinen materiaali, jonka sisään ilmanpaineen vaihtelut pääsevät kulkeutumaan, kuten lasikuitumatto tai avosoluinen vaahto. Nämä materiaalit muuttavat ääntä lämpöenergiaksi ilman liikkeen aiheuttaman kitkan avulla. [9, s.126; 12]. Huokoinen materiaali absorboi parhaiten taajuuksia, joiden aallonpituus on nelinkertainen huokoisen eristekerroksen paksuuteen verrattuna. Matalien äänien aallonpituudet ovat pitkiä; taajuudeltaan 100Hz äänen aallonpituus on ilmassa 3,40m ja sen neljänneskin on vielä 0,85m. Tällaisiin eristekerroksiin ei palo-ovissa päästä. Tämän vuoksi huukoiset materiaalit eristävät pääasiassa keskikorkeita ja korkeita taajuuksia, joiden aallonpituudet ovat lyhyempiä. [9, s. 126]

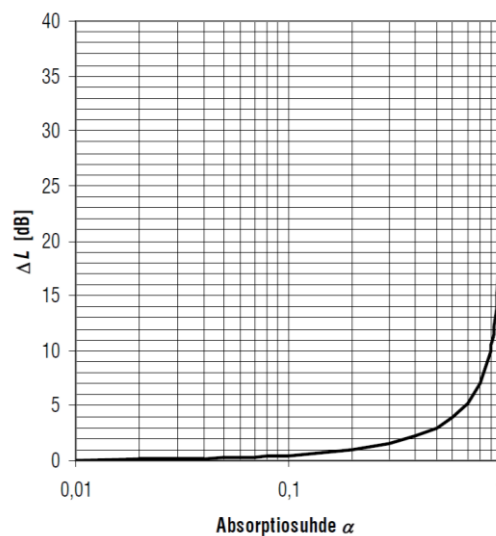
Ääniaalto heijastuu osuessaan kiinteään esteeseen [10, s. 41]. Heijastuskerroin  $r$  kuvaa kappaleesta heijastuneen äänen intensiteetin suhdetta kappaleeseen kohdistuneeseen äänen intensiteettiin [10, s. 206]. Absorptiokertoimen  $\alpha$  ja heijastuskertoimen  $r$  välistä suhdetta voidaan kuvata kaavalla [10, s. 209; katso 11]:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (4)$$

Yhtälöstä nähdään, että kun absorptio kasvaa, alenee heijastuminen. Ääniaallon heijastuessa materiaalin pinnasta se menettää energiaa absorption vaikutuksesta. Absorptio onkin erityisen hyödyllinen tilanteissa, missä ääntä halutaan vähentää siinä tilassa, missä äänilähde sijaitsee. Äänitehotason  $L$  [dB] alenema määrä voidaan laskea kaavalla [9, s. 38]:

$$\Delta L = 10 \log \frac{1}{1-\alpha} \quad (5)$$

Absorptiosuhteen vaikutusta äänitehotason alenemaan on havainnollistettu kuvassa 2.5. Vasta suhteellisen korkeilla absorptiokertoimilla alkaa äänitehotason alenema kasvaa.



**Kuva 2.5.** Absorptiosuhteen vaikutus heijastuksessa tapahtuvaan äänitehotason alenemaan  $\Delta L$ . [9, s. 39]

Hyvänä ääntä pysäyttävinä barrier-materiaaleina pidetään ääntä heijastavia materiaaleja, jotka pitävät äänen tietyn tilan sisällä ja siten estävät äänen siirtymisen muihin tiloihin. Tällaisia materiaaleja ovat tiiviit sekä tiheät materiaalit, kuten betoni, teräs tai kipsilevy, joilla on matala absorptiokerroin  $\alpha$ . Heikosti ääntä absorboivien materiaalien sisäiset häviökertoimet  $\eta_{int}$  ovat usein huonoja eivätkä nämä materiaalit kykene estämään rakenteen sisälle päässeän äänen kulkua rakenteen sisällä. Ovien ääneneristysominaisuudet kuitenkin vaativat riittävän häviökertoimen hyvän ääneneristyskyvyn takaamiseksi. [13, s. 54] Taulukossa 2.1 on vertailtu eri materiaalien absorptiosuhdetta  $\alpha$  ja sisäistä häviökerrointa  $\eta_{int}$ .

**Taulukko 2.1.** Eri materiaalien äänenvaimennusominaisuuksien vertailu taajuudella 1000 Hz.

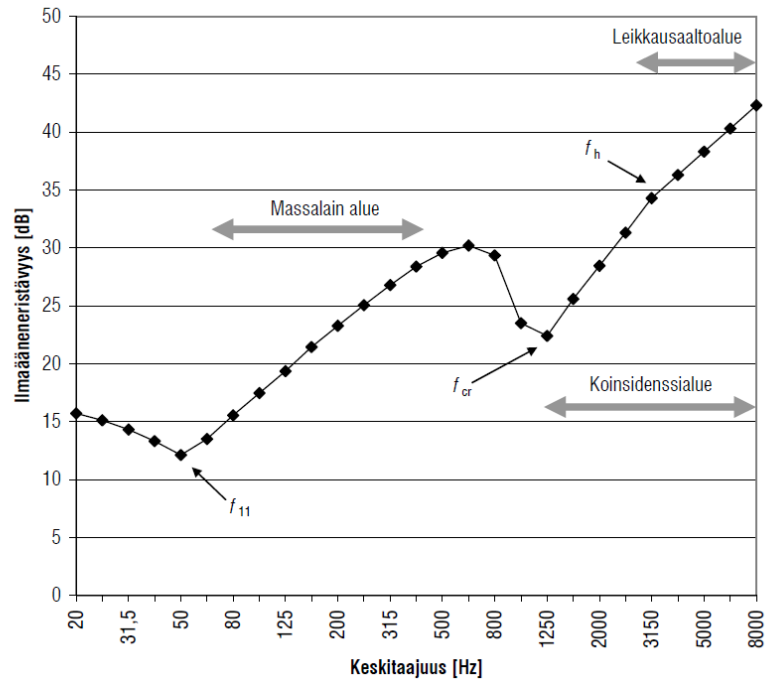
Materiaali	Absorptiosuhde $\alpha$	Sisäinen häviökerroin $\eta_{\text{int}}$	Lähde
Betoni	0,02	0,005...0,02	9, s. 52; 13, s. 59
Ikkunalasi	0,10...0,12	0,006...0,02	9, s. 52; 15
Kipsilevy	0,05...0,08	0,006...0,022	9, s. 52; 13, s. 59; 15
Lasikuitulujitettu polyesteri	0,70	0,0035	14; 16
Lasikuitumatto (paksuus 51mm)	0,90	1,0	12; 15
Puu	0,07	0,01...0,02	9, s. 52; 13, s. 59
Teräs	0,00...0,10	0,0001...0,0006	9, s. 52; 17

Polymeerien sisäinen vaimennuskerroin riippuu paljon käytetystä polymeeristä sekä tämän käyttölämpötilasta. Äänenvaimennuskyky on kaikilla polymeerityypeillä parhaimmillaan lasisiirtymälämpötilassa. Amorfisten kestopuovien äänenvaimennuskyky kasvaa selkeästi siirryttäessä niiden lasinsiirtymälämpötila-alueelle, kun taas osakiteisillä ja kertamuoveilla muutos äänenvaimennuksessa on selvästi pienempi [18]. Käytännössä kuitenkin lasinsiirtymälämpötila on harvoin tuotteen suunniteltu käyttölämpötila. Esimerkiksi palo-ovissa käytettävien ristisilloittuneiden polymeerien mekaaniset ominaisuudet eivät ole riittävät lasinsiirtymäalueella polymeerisen rungon valmistamiseksi. Lasinsiirtymälämpötilan alapuolella ristisilloittunut polymeeri muistuttaa kovaa muovia ja sen yläpuolella pehmeää kumimaista materiaalia. [19, s. 7]

Yleisesti voidaan todeta, että yksittäinen materiaali ei voi yhtä aikaa olla sekä hyvä barrier-materiaali että hyvä absorptiomateriaali. Yhdistämällä kaksi ääneneristysominaisuuksiltaan erilaista materiaalia voidaan rakenteeseen kuitenkin aikaansaada hyvä ääneneristyskyky.

Meluntorjunnassa täytyy huomioida myös melun äänentaajuus. Rakenteilla on yleisesti kolme rajataajuutta, joiden alueella rakenteen ääneneristyskyky laskee huomattavasti. Taajuuksista matalin on rakenteen alin ominaistaajuus  $f_{1l}$ , keskimäinen taajuus on koinsidenssin rajataajuus  $f_c$  ja korkein taajuus on leikkausaaltoalueen rajataajuus  $f_h$ . Alin ominaistaajuus  $f_{1l}$  on usein niin alhainen, että se jää rakennusakustiikassa käsiteltävän taajuusalueen alapuolelle. Ohuiden rakenteiden, kuten ovien, leikkausaaltoalueen rajataajuus  $f_h$  sen sijaan jää tämän taajuusalueen yläpuolelle, eikä sitä tässä yhteydessä kannata yksityiskohtaisemmin käsitellä. Tärkein rajataajuus on siksi koinsidenssin rajataajuus  $f_c$ , joka yleensä sijaitsee ääneneristysmittausten kannalta mielenkiintoisella alueella 50-3150 Hz [9, s. 48]. Kuvassa 2.6 on esitetty eri taajuuksilla mitattuja ilmaääneneristävyiden arvoja, joista voidaan havaita yllämainitut rajataajuudet.





**Kuva 2.6.** Ilmaääneneristävyyden yleinen riippuvuus taajuudesta sekä ilmaäänieristysten teorioiden vaikutusalueet. Alueet riippuvat rakenteen massasta sekä jäykyydestä. Kuvaan on merkitty kuvitteellisen rakenteen alin ominaistajuus  $f_{11}$ , koinsidenssin rajataajuus  $f_c$  (kuvassa  $f_{cr}$ ) sekä leikkausaaltoalueen rajataajuus  $f_h$ . [9, s. 49]

Alin rajataajuus  $f_{11}$  riippuu levymäisellä rakenteella sen kiinnityksistä ympäröiviin rakenteisiin ja sen sivumitoista  $l_x$  ja  $l_y$  [m]. Tämä rajataajuus voidaan laskea koinsidenssin rajataajuuden  $f_c$  avulla. Reunoiltaan nivelin tuetun levyn alin ominaistajuus  $f_{11}$  voidaan laskea kaavalla [9, s. 49]:

$$f_{11} = \frac{c^2}{4f_c} \left( \frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} \right)$$

missä  $c$  [m/s] on äänen nopeus ilmassa mittaustilassa.

Alimman rajataajuuden  $f_{11}$  ja koinsidenssin rajataajuuden  $f_c$  välillä ilmaääneneristävyys  $R_0$  noudattaa massalakia:

$$R_0 = 20 \log m' + 20 \log f - 47 \quad (6)$$

missä  $m'$  on rakenteen neliömassa [ $\text{kg/m}^2$ ] ja  $f$  äänentaajuus [Hz]. Pienillä äänentaajuuksilla rakenteeseen kohdistuu vähemmän ääniaaltoja aikayksikössä kuin korkeilla äänentaajuuksilla. Massalakiin voidaan tehdä muutos, jolla tämä otetaan huomioon. Muutoksen koko riippuu äänen nopeudesta  $c$  [m/s] ilmassa mittaustilassa sekä rakenteen mitoista  $l_x$  ja  $l_y$  [m], jolloin kaava (6) saa muodon:

$$R_0 = 20 \log m' + 20 \log f - 42 - 10 \log \left( \ln \left( \frac{2\pi f}{c} \sqrt{l_x l_y} \right) \right) \quad (7)$$

Massalain mukaisesti tiheimmät kappaleet eristävät ääntä vähemmän tiheitä kappaleita paremmin. Ääniaallon kohdatessa materiaalin pinnan pyrkii ääniaalto välittymään kyseiseen materiaaliin. Tämä tapahtuu värinän avulla. Mitä suurempi on ääniaallon kohdanneen materiaalin tiheys, sen suurempi on sen taipumus pysyä levossa. Ääneneristävyys paranee massalain mukaan 6 dB, kun rakenteen neliömassa kaksinkertaistetaan tai eristettävän äänen taajuus kaksinkertaistuu. Käytännössä tämä tarkoittaa rakenteen läpäisevän äänen äänenpaineen puolittumista. [20]

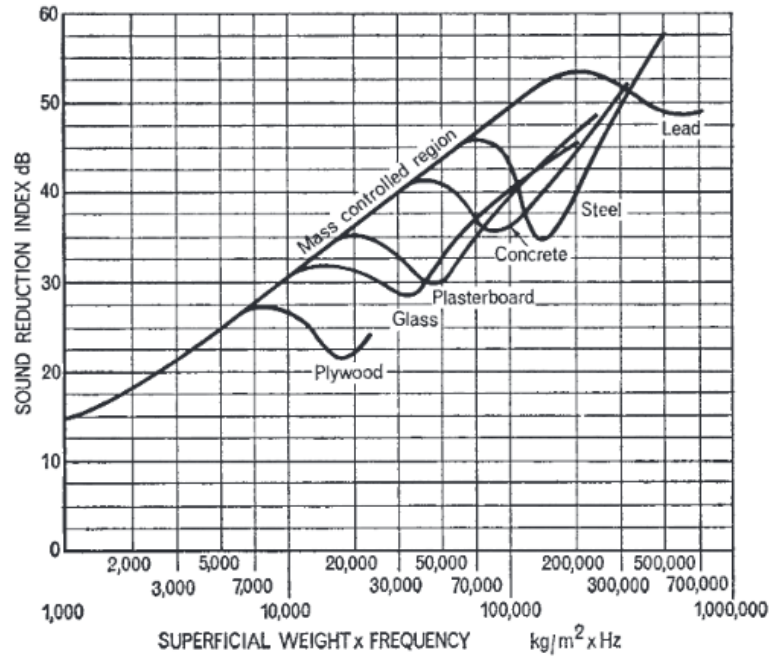
Ilmaääneneristävyys paranee taajuuden funktiona massalain mukaan aina siihen asti, kunnes äänentaajuus on noin puolet koinsidenssin äänentaajuudesta  $f_c$ . Tällöin eristävyys alkaa laskea, johtaen minimiin koinsidenssirajataajuuden kohdalla. Tämä rajataajuus riippuu rakenteen taivutusjäykkyydestä  $B$  sekä neliömassasta  $m'$  [kg/m<sup>2</sup>]:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B}} \quad (8)$$

äänennopeutena  $c$  [m/s] ilmassa käytetään yleisesti arvoa 340 m/s. Taivutusjäykkyys voidaan laskea rakenteen Youngin moduulin  $E_Y$  [N/m<sup>2</sup>], Poissonin vakion  $\nu$  sekä rakenteen paksuuden  $h$  [m] perusteella.

$$B = \frac{E_Y}{(1-\nu^2)} \frac{h^3}{12} \quad (9)$$

Koinsidenssin rajataajuus on sitä suurempi, mitä pienempi rakenteen jäykkyys on ja mitä suurempi rakenteen neliömassa on. Kevyen ja jäykän rakenteen koinsidenssin rajataajuus on pieni, kun taas raskaan ja joustavan rakenteen koinsidenssin rajataajuus on suuri. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 2.7, missä eri materiaalien massalain voimassaoloaluetta on verrattu toisiinsa.



**Kuva 2.7.** Massalain voimassaoloalue eri materiaaleille. Kuvan esittämä ääneneristyskyvyn lasku johtuu rakenteen koinvidenssin rajataajuudesta. [21, s. 118]

Ilmaääneneristävyys lasketaan eri taajuusalueilla kaavoilla:

$$R = R_0 + 20 \log \left( 1 - \left( \frac{f}{f_c} \right)^2 \right), \text{ kun } f < f_c \quad (10)$$

$$R = R_0 + 10 \log \eta + 10 \log \frac{f}{f_c} + 3, \text{ kun } f_c \leq f \leq f_h \quad (11)$$

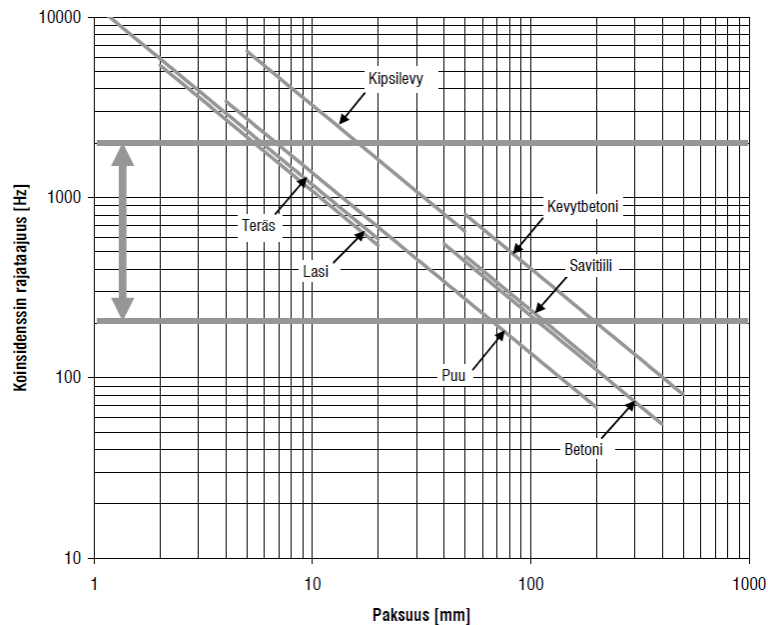
missä  $\eta$  on rakenteen häviökerroin, mikä kuvaa äänen värähtelyn vaimenemista rakenteen sisällä. Tämä häviökerroin koostuu muun muassa rakenteen kiinnityksistä muihin rakenteisiin sekä rakenteen sisäisestä häviökertoimesta  $\eta_{int}$ , joka on materiaaliominaisuus. Häviökerroin lasketaan kaavalla

$$\eta = \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad (12)$$

Kuvassa 2.8 esiintyy eri materiaalien koinvidenssin rajataajuuksia. Kuvaan on myös merkitty alue, jolla rakenteen koinvidenssin rajataajuus ei saisi sijaita, sillä tällöin ei saavuteta toivottuja ääneneristysominaisuuksia. Yleisesti koinvidenssin rajataajuus tulisi olla joko yli 2000 Hz tai alle 200 Hz. Tällöin koinvidenssin rajataajuus ja täten myös alentunut vaimennuskyky ei asetu esimerkiksi ihmisen puheen alueelle.

Yleisessä käytössä olevia yksinkertaisia rakennuslevyjä yhdistää niiden suhteellisen alhainen pintamassa (5-35 kg/m<sup>2</sup>). Kasvattamalla tätä massaa saavutetaan selvä parannus ääneneristysominaisuuksiin massalain mukaisesti. On kuitenkin huomattava, että koinvidenssin rajataajuus ei saa muuttua, mikä vaikuttaa suoraan rakenteen

suunnitteluun. Koinssidenssin rajataajuuden laskun vuoksi ei rakenteista saa tehdä liian paksuja ja esimerkiksi kipsilevyjen paksuuden tulisi aina jäädä alle 15 millimetrin. Myös päällekkäisten kipsilevykerrosten toisiinsa kiinnittäminen tulisi tehdä muutoin kuin liimaamalla, sillä liimaaminen mahdollistaa värähtelyn siirtymisen helposti rakenteessa, alentaen koinssidenssin rajataajuutta.



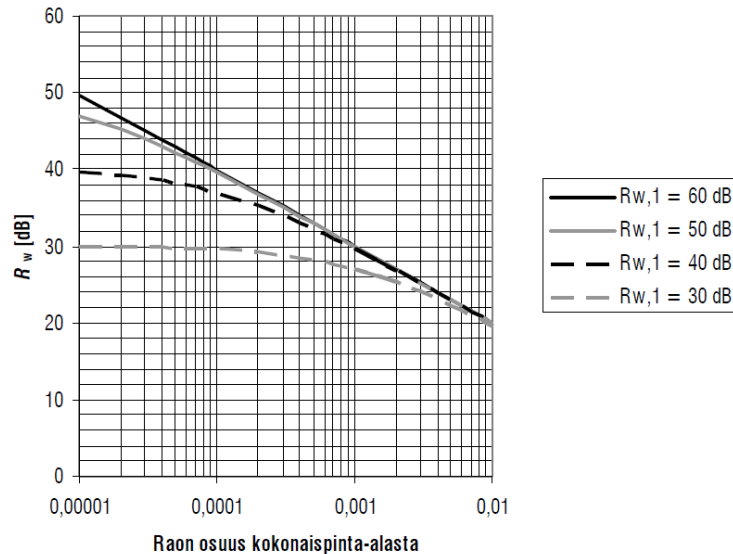
**Kuva 2.8.** Eri materiaalien koinssidenssin rajataajuuksia  $f_c$  rakenteen paksuuden funktiona. Kuvaan on merkitty vaakasuorilla viivoilla taajuusalue, jonka ulkopuolella rajataajuuden tulisi yleensä olla. [9, s. 51]

Rakenteen ääneneristävyyteen liittyy myös sen tasalaatuisuus. Oven tasalaatuisuudella tarkoitetaan oven tasaisia ääneneristysominaisuuksia koko oven pinta-alalla. Pieni heikosti eristävä alue voi pilata koko oven ääneneristävyyden. Useasta osasta koostuvan rakenteen, eli esimerkiksi ikkunan sisältävän oven, kokonaisääneneristävyys voidaan laskea, kun oletetaan että ääniteho jakautuu tasaisesti rakenteen osille  $i$  niiden pinta-alojen  $S_i$  suhteessa. Tällöin rakenteen kokonaisääneneristävyys voidaan laskea kaavalla

$$R = 10 \log \left( \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n S_i 10^{-R_i/10}} \right) \quad (13)$$

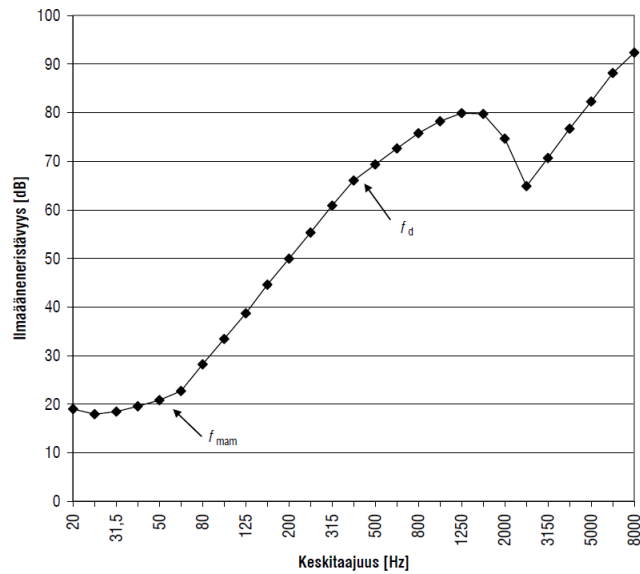
missä  $R_i$  on eri rakenneosien ääneneristävyys. Ääneneristysominaisuuksiltaan heterogeeninen alue on ääneneristysominaisuuksiltaan aina lähempänä heikommin eristävää komponenttia kuin paremmin eristävää komponenttia. Täten ääneneristysominaisuuksia tulisi ensin pyrkiä parantamaan heikoimmasta komponentista.

Ääneneristyksessä on kyse itse oven ääneneristuksen lisäksi myös ovenkarmien ääneneristävydestä sekä oven istuvuudesta karmeihin. Mikäli ovi ei ole täysin tiivistetty, alenee rakenteen ääneneristyskyky merkittävästi. Asettamalla edelliseen kaavaan raon ääneneristävydeksi nolla, saadaan hyvä approksimaatio rakenteesta, missä esiintyy rako. Mikäli oven reunoille jää esimerkiksi 0.1 % oven kokonaispinta-alan kokoinen rako, laskee rakenteen ääneneristävyys esimerkiksi 60 dB:stä 30 dB:iin kuvan 2.9 mukaisesti. Palo-ovien raot vaikuttavat lisäksi myös savun levittymiseen rakennuksen sisällä. [22]



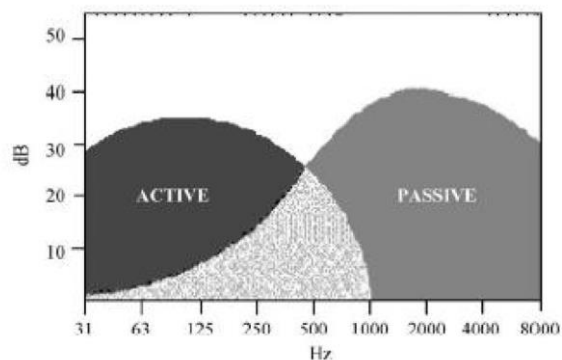
**Kuva 2.9.** Raon vaikutus ilmajääneneristysominaisuuteen. Selite sisältää tiiviin rakenteen ilmajääneneristysluvun. [9, s. 83]

Oven sisäinen rakenne merkitsee ääneneristyksessä paljon. Heterogeenisessa rakenteessa edetäkseen on ääniaallon siirryttävä erilaisten materiaalarajapintojen läpi. Rajapinnoissa ääniaallon energiasta osa hukkuu. Rajapintojen hyödyntäminen on hyödyllisintä silloin, kun kahden pinnan välillä ei ole fyysistä kosketusta lainkaan, vaan kaikki värinät joutuvat siirtymään viereiseen kappaleeseen väliaineen läpi. Tällöin kyseessä on kaksinkertainen rakenne, missä kerrosten väliin jäänyttä ilmapäliä hyödynnetään massa-jousi-järjestelmässä jousena. Tällöin ilmajääneneristävyys kasvaa nopeasti massa-jousi-massa –ominaistaajuuden (mass-air-mass resonant frequency)  $f_{mam}$  yläpuolella kuvan 2.10 mukaisesti. Toisaalta poistamalla tämä kerrosten välinen väliaine kokonaan, eli luomalla tyhjiö rakenteen sisälle, voidaan äänen johtuminen estää kokonaan. Käytännössä tämä on kuitenkin palo-oviapplikaatiossa lähestulkoon mahdotonta valmistusteknisistä ja kustannussyistä.



**Kuva 2.10.** Kaksikerrosrakenteen ilmaäänieristys eri taajuuksilla. [9, s. 58]

Erityisesti alhaisille taajuuksille voidaan lisätä ääneneristävyyttä aktiivisin menetelmin. Tämä tarkoittaa rakenteeseen kiinnitettävää, värinää aiheuttavaa komponenttia. Tämä komponentti pyrkii tuottamaan ääntä kumoavaa värinää. Ongelmana on kuitenkin komponentin hinta ja energiantarve sekä mahdollinen huoltotarve. Mahdollisuutena on kuitenkin rakenteen alhaisempi paino, sillä matalien taajuuksien vaimennuksen vaatimaa massaa ei tarvita yhtä paljon. Kuvassa 2.11 on esitetty aktiivisen melunvaimennuksen mahdollisuuksia perinteiseen passiiviseen melunvaimennukseen verrattuna. Suurta äänenvaimennusta vaativissa applikaatioissa voi aktiivisen ja passiivisen äänenvaimennuksen yhdistäminen olla hyvä idea, jotta äänen vaimennusta saadaan koko taajuusalueelle.



**Kuva 2.11.** Aktiivisen ja passiivisen ääneneristyksen vaikutusalueet. [23, s. 4; katso 24]

Ilmaääneneristävyyden mittaaminen vaatii kaksi erillistä mittaustulosta – rakenteeseen osuneen äänitehon ja rakenteen läpi kulkeutuneen äänitehon, yhtälön (2) tapaan. Käytännössä ilmaääneneristävyys määritetään kaiuntahuonetta käyttäen, jolloin lähetys- ja vastaanottohuoneiden äänenpainetasot voidaan määrittää.

Lähetyshuoneessa pidetään kohinageneraattoria sekä kaiutinta, joka tuottaa huoneeseen kohinaa, jonka äänenpainetaso on likipitään sama kaikilla taajuuksalueilla 100-3150 Hz [9, s. 65]. Tämän huoneen äänenpainetaso  $L_1$  sekä vastaanottohuoneen äänenpainetaso  $L_2$  mitataan. Äänenpainetason mittaaminen sekä kaiuttimien ja mikrofoniin sijainnit ovat määritelty standardeissa ISO 140-3 ja ISO 140-4. Vastaanottohuoneen absorptioala  $A$  [m<sup>2</sup>] tulee myös tietää ilmaäänieristävyyden määrittämiseksi. Tämä voidaan määrittää vastaanottohuoneen kaiunta-ajan avulla. Ilmaäänieristävyyden arvo lasketaan kaavalla:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (14)$$

missä  $S$  [m<sup>2</sup>] on tiloja erottavan rakenteen pinta-ala. [9, s. 65]

Ilmaäänieristävyydluku  $R_w$  [dB] on rakenteen yhdellä luvulla ilmaistu ilmaääneneristävyys, joka saadaan mittaamalla eri taajuuksien ilmaäänieristävyys ja vertaamalla mitattua tulosta standardin ISO 717-1 vertailukäyriin. Sopivan käyrän löytymisen jälkeen luetaan vertailukäyrän ilmaäänieristävyydluku 500 Hz:n kohdalta. [9, s. 67] Yhdysvalloissa käytetään vastaavaa menetelmää, jota määrittelee standardit ASTM E413-70T ja ASTM E90 [12]. Standardien eroina on muun muassa eri mitattava taajuuksalue. ISO 140 standardissa mitataan laajempi taajuuksalue 100-5000 Hz, kun taas ASTM E413-70T ja ASTM E90 –standardeissa mitta-alue on 125-4000 Hz.

Ääneneristävyys on siis monimutkainen asia, missä oven lopulliseen ääneneristyskykyyn vaikuttaa ovensa käytettyjen materiaalien lisäksi myös oven rakenne, kiinnitys sekä oven ja karmien tiiveys. Tavoitteena olisi valita materiaalit siten, että niiden jäykkyyden ja massan suhde olisi koinsidenssin rajataajuuden kannalta sopiva, ovi absorboisi vähän ääntä ja vaimentaisi tehokkaasti oven sisälle päässeän äänen, oven sisäisten kerrosten väliin jäisi ilmarako, ovi olisi kauttaaltaan tasalaatuinen, ja että se istuisi tiiviisti karmissaan. Osa näistä ääneneristävyyteen liittyvistä vaatimuksista on kuitenkin ristiriidassa oven muiden vaatimusten kanssa. Raskaan ja taipuisan oven valmistaminen olisi oven toiminnan kannalta ongelmallista. Lisäksi kaksinkertaisessa ovirakenteessa oven sisäiset ilmarat haittaisivat oven pintalevyjen välisiä voimien siirtoa ja siksi myös käyttäytymistä palotestissä, kun ovi jäisi mekaanisilta ominaisuuksiltaan heikoksi.

### 2.1.3 Lämmöneristys

Palo-oven tärkein ominaisuus on lämmöneristys. Lämpöä eristämällä pystyy palo-ovi estämään palon leviämisen muihin rakennuksen osiin antaen pelastus- ja sammutushenkilökunnalle aikaa vähentää henkilö- ja materiaalivahinkoja. Palo-ovien lämmöneristystä seurataan lähinnä erilaisilla polttokammio- ja palotestillä, missä testattava palo-ovi altistetaan simuloidulle toispuoleiselle palolle.

Levyrakenteen lämmöneristyskykyä voidaan arvioida rakenteen läpi johtuvan lämpöenergian  $dQ$  määränä aikayksikössä  $dt$  [25, s. 571]:

$$H = \frac{dQ}{dt} = kS \frac{T_H - T_L}{d} \quad (15)$$

missä  $H$  on lämpövirta [W],  $k$  lämmönjohtavuus [W/(Km)],  $S$  levyn pinta-ala [m<sup>2</sup>],  $T_H$  korkeampi lämpötila, mistä lämpöä siirtyy kohti matalampaa lämpötilaa  $T_L$  [K] ja  $d$  levyn paksuus [m]. Rakennetta, missä lämpötila muuttuu epälineaarisesti rakenteen sisällä voidaan kuvata yhtälöllä

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kS \frac{dT}{dx}, \quad (16)$$

missä  $T$  on lämpötila [K] ja  $x$  [m] syvyys rakenteen pinnasta. Lausekkeen negatiivisuus viittaa lämpövirran alenevan lämpötilan kulkusuuntaan. Merkkaamalla konduktanssiksi  $U$  [W/m<sup>2</sup>K]:

$$U = \frac{k}{dx} \quad (17)$$

voidaan kirjoittaa:

$$\frac{dQ}{dt} = US(-dT) \quad (18)$$

Konduktanssin käänteisluku on terminen resistiivisyys  $R_t$ :

$$R_t = \frac{1}{U} = \frac{dx}{k} = \frac{S(-dT)}{\frac{dQ}{dt}} \quad (19)$$

mistä seuraa

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{S(-dT)}{R_t} \quad (20)$$

Levyrakenteessa pinta-ala sekä lämpövirta ovat kaikille rakenteen osille samat. Tavoitteena on minimoida rakenteen läpi siirtyvä lämpö. Tämä aikaansaadaan maksimoimalla resistiivisyyden  $R_t$  arvo eli minimoimalla konduktanssin  $U$  arvo. Resistiivisyys koko rakenteelle voidaan laskea kaavalla

$$R_t = \frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} + \dots \quad (21)$$

Tästä kaavasta nähdään, että jo yksi useasta kerroksesta koostuvassa rakenteessa oleva hyvin lämpöä eristävä kerros parantaa koko rakenteen lämmöneristävyyttä paljon.



Polttokammiotestejä on lukuisia ja ne eroavat toisistaan monella tavalla. Yleensä palotesteissä keskitytään kahteen asiaan: rakenteen lämmöneristyskykyyn sekä rakenteen tiiveyteen. Oven tulee testin ajan rajata palo palokammioon, jolloin oven läpi ei saa tulla liekkejä, eikä rakoja tai reikiä saa muodostua ja oven pinta ei saa syttyä palamaan. Testattavan oven lämpötilaa tarkkaillaan palolle altistamattomalta puolelta, mistä mitattujen lämpötilojen keskiarvo ei saa ylittää 140 °C ympäröivään huoneenlämpötilaan verrattuna eikä yhdenkään yksittäisen mittauspisteen lämpötila saa ylittää 180 °C:lla ympäröivää huoneenlämpötilaa. Polttokammiotestiä jatketaan, kunnes etukäteen suunniteltu testiaika ylittyy tai kun näytteestä mitatut lämpötilat ylittävät standardien rajat. Mikäli ovi ei täytä standardin vaatimia lämmöneristysominaisuuksia eli eristävyysvaatimuksia, voi oven tiiveyttä mitata jatkamalla koetta. Tällöin kuitenkin oven tiiveyden ja lämmöneristävyyden arvot on ilmoitettava erikseen. Kokeessa käytetään aina kahta ovea, jotta ovien molemmat pinnat ja aukeamissuunnat saadaan testattua. Kuvassa 2.12 suoritetaan lasiovelle polttokammiotestiä. Kuvasta nähdään muun muassa lasia vasten asennettujen termoelementtien sijoituspaikat.



**Kuva 2.12.** Lasiovien polttokammioke. [26]

Euroopassa yleisesti käytetty standardi on brittiläinen BS 476 osa 22 (1987). Tämä standardi asettaa kappaleen koolle, kiinnitykselle, lämpötilan mittaamiseen tarkoitettujen termoelementtien sijainnit, polttokammion lämpötilan nousunopeuden sekä polttokammion paineen mittaamiseen tarkoitettujen mittareiden paikan ja lukumäärän. Standardin mukaisessa polttokammiokeksessa mitataan palo-oven lämpötilan nousua, oven taipumaa sekä koossapysymistä. BS 476 –standardin, kuten muidenkin tässä esitettyjen vastaavien standardien tuloksena, saadaan minuuttimäärä, minkä ovi kestää polttokokeessa standardin puitteissa.

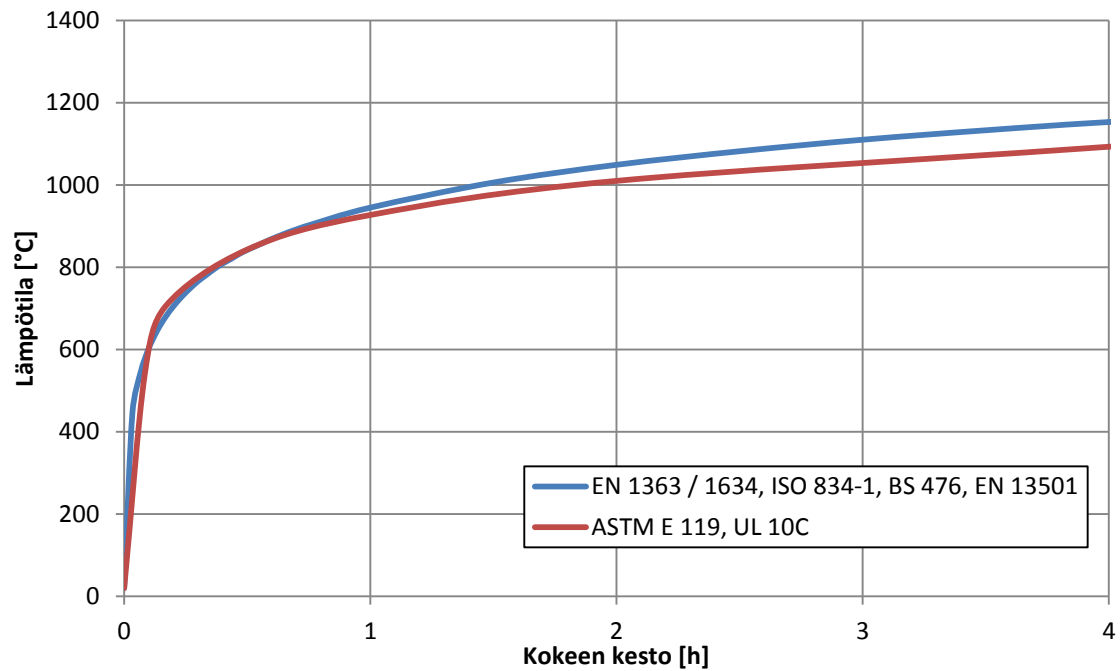
BS 476 –standardia uudemmat EN ISO 1363-1: 2000 ja EN 1634-1:2014 -standardit määrittelevät myös testikappaleen mitat, kiinnityksen, kappaleelle suoritettavat esivalmistelut, termoelementtien sijainnit sekä oven alueen paine-erot. ISO 1363 ja ISO 1634 ovat lämpötilan nousultaan samat kuin BS 476. EN ISO 1363 ja EN 1634 ovat standardissa esitettävän polttokammion positiivisen paine-eron vuoksi BS 476 –standardia vaikeampi läpäistä.

EN 13501 –standardi määrittelee muun muassa rakenteen tiiveyden (E) ja eristävyys (I) palotilanteessa. EN 13501 käyttää samaa lämpökäyrää kuin standardi EN ISO 1363. Tunnin palokokeen onnistuneesti tiiveyden ja eristävyys osalta selvittänyt ovi saa merkinnäkseen EI60. Mikäli ovi täyttää vain tiiveydelle asetetut vaatimukset, saa ovi merkinnäkseen E60.

Yhdysvalloissa suositut ASTM 119E ja UL 10C –paloluokitukset eroavat eurooppalaisista standardeista muun muassa polttokammion lämpötilakäyrän osalta. ASTM 119E ja UL 10C –standardien lämpötilakäyrät nousevat kokeen alussa jyrkemmin, mutta tasoittuvat sitten eurooppalaisia standardeja nopeammin (kuva 2.12). Tämä jättää testin loppuvaiheessa polttouunin lämpötilan alhaisemmaksi. UL 10C –standardissa polttouunin neutraali paine asettuu testattavan oven puoleenväliin, kun taas ASTM 119E –standardissa ei mainita polttouunin painetta. ASTM 119E –standardissa veloitetaan myös suihkuttamaan kappaleen pintaa vedellä heti kokeen päätyttyä simuloiden tulipalon sammutustapahtumaa.

Yllämainittujen standardien lämpökäyrät ovat esitetty kuvassa 2.13. Näiden standardien määräämät lämpötilakäyrät nousevat nopeasti noin 700 °C:een, jonka jälkeen lämpötilan nousu hidastuu. Lämpötila jatkaa kasvuaan koko testin ajan aina kuuteen tai kahdeksaan tuntiin asti [27, 28]. Käyrä ei vastaa täysin todellista huonepaloa, missä lämpötilan nousee aluksi nopeasti ja jonka jälkeen palo heikkenee, kun palava materiaali on poltettu loppuun. Lämpötilan nousu oikeassa tulipalossa riippuu palavan materiaalin määrästä sekä ilmanvaihdosta. [29]

Polttokammion lämpötila asettaa palo-ovessa käytetyn ydinmateriaalin lämpötilankestoille vähimmäisvaatimuksen. Ovenssa käytettyjen ydinmateriaalien tulee kestää syttymättä ja muotoonsa merkittävästi muuttamatta koko polttokammiotestin ajan. Kuten ääneneristyksessäkin, on oven tasalaatuisuus ja tiivis istuvuus karmeissaan tärkeää. Tasalaatuisuus helpottaa estämään kuumien alueiden syntyä palo-oveen polttokokeen aikana. Oven ja karmien tiiveyteen vaikuttaa merkittävästi ovilevyn taipumattomuus polttokokeen aikana, jolloin oveen kohdistuu suuri lämpötilagradientti. Taipumattomuus edesauttaa myös palokaasujen rajaamista.



**Kuva 2.13.** Standardien EN ISO 1363, EN 1634, ISO 834-1, EN 13501, BS 476, ASTM E 119 ja UL 10C määrittämät polttokammion lämpötilakäyrät.

## 2.2 Palo-ovien rakenne

Palo-ovet koostuvat useasta osasta. Aivan oven pinnassa sijaitsee pintakerros, mikä antaa ovelle sen ulkonäön. Tämä kerros voi siis olla esimerkiksi maalikerros. Pintakerroksen alla sijaitsee varsinainen pintamateriaali, millä on valtava vaikutus oven ominaisuuksiin. Pintamateriaalia syvemmillä on oven keskiosassa sijaitseva ydinaihio. Oveen toiminnan kannalta tärkeät lisäosat, kuten ovensulkimet, lukkopesät, mekaanista lujuutta antavat tai säteilyä eristävät insertit, kiinnitetään joko pintamateriaaliin tai ydinaihioon, riippuen oven rakenteesta ja sen ominaisuuksista. Oveen kiinnitettävät saranat, lukkopesät ja ovensulkimet voivat vaatia lisävahvistusta oven sisällä kuvan 2.14 esittämissä paikoissa. Kuvasta 2.14 nähdään myös oven sisälle asetettava lämpöä eristävä keraamilevy ja oven reunukseen kiinnitettävä palotiiviste.



**Kuva 2.14.** Teräksisen palo-oven rakenne. [30]

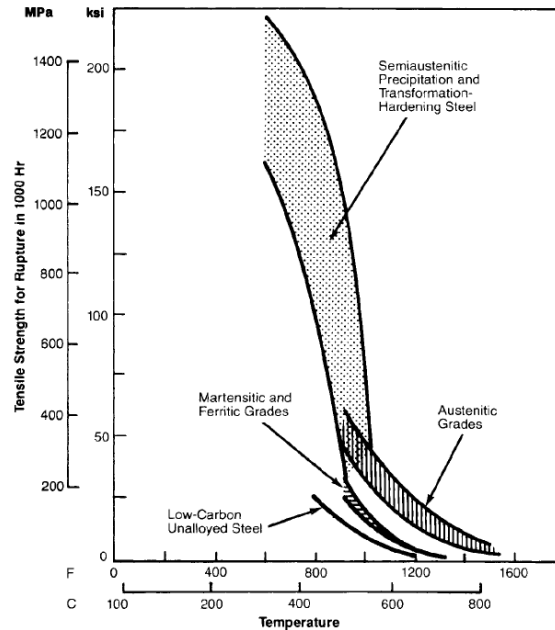
Palo-oviin voidaan asentaa myös ikkunoita. Tällöin standardien määrittelemää lämpötilaa ei mitata ikkunan kohdalta vaan muualta oven alueelta. Jos oveen asennetaan ikkuna, on otettava huomioon ikkunan ja sitä ympäröivän materiaalin lämpölaajenemisero, jotta ikkunan särkymiseltä vältetään palotilanteessa.

## 2.2.1 Pintamateriaalit

Palo-ovien pintamateriaaleina käytetään yleisesti kolmea eri vaihtoehtoa: ruostumatonta terästä, puuta tai polymeeriä. Kaikilla näillä on omat hyvät ja huonot puolensa, eikä yksi sovellu välttämättä kaikkiin kohteisiin. Tämän vuoksi on tärkeitä tuntea jokaisen pintamateriaalivaihtoehdon edut ja haasteet.

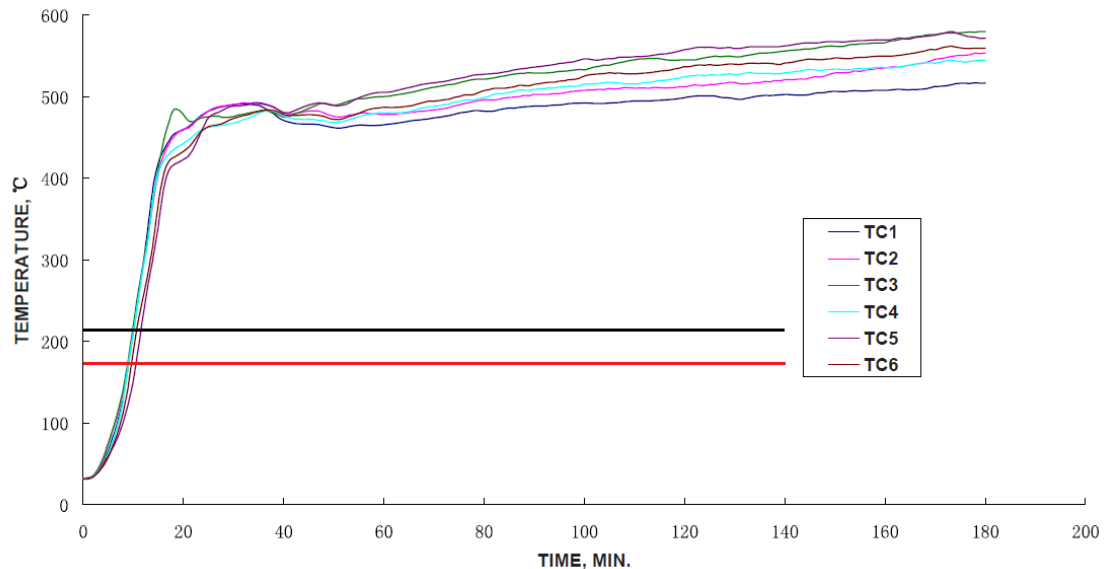
Ruostumattoman teräksen käyttö palo-ovimateriaalina on hyvä vaihtoehto, kun oven hinta on tärkeä kriteeri, mutta paino ja lommoontumisen kesto ovat vähemmän tärkeitä. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu ovi voidaan maalata tai jättää pintakäsittelemättä. Ruostumattomasta teräksestä valmistetun oven kantava rakenne on pintamateriaalina toimiva teräs. Teräs kantaa oveen kohdistuvat ulkopuoliset voimat, jolloin oven ydinaihion mekaanisille ominaisuuksille ei tarvitse asettaa tiukkoja vaatimuksia. Ruostumattomien teräksien mekaaniset ominaisuudet kuitenkin laskevat lämpötilan noustessa. Kuvasta 2.15 nähdään, että jo 600 °C:ssa mekaaninen lujuus on merkittävästi alentunut ja 800 °C:ssa mekaaniset ominaisuudet on pääasiassa menetetty. Ruostumattomat teräkset kestävät kuitenkin sulamatta jopa 1370-1530 °C lämpötiloja

[31]. Toispuoleisessa palokokeessa kuuman puolen pinta voi pehmentyä, mutta viileän puolen pinta säilyttää valtaosan mekaanisesta lujuudestaan mahdollistaen oven koossapysymisen. Palotestit ovat kestoltaan riittävän lyhyitä ja mekaanisilta kuormiltaan riittävän alhaisia, jotta viruminen ei muodosta ongelmaa. Teräsoven rakenne kestää myös palokokeiden päättyessä mahdollisesti tapahtuvat sammutusta simuloivat vesisuihkutestit.



**Kuva 2.15.** Erilaisten ruostumattomien terästen korkean lämpötilan ominaisuudet. [31]

Korkean lämmönjohtavuutensa (noin 16 W/(m\*K)) vuoksi ruostumattoman teräsoven sisälle täytyy asettaa lämpöä eristävä kerros. Kuvassa 2.16 on esitetty UL 10 C –standardin mukaisen polttokammiokokkeen tulokset eristämättömälle teräsovelle. Oven lämpötila nousee erittäin nopeasti Euroopassa ja Yhdysvalloissa laajalti käytettyjen standardien rajojen ylitse. Korkeista pintalämpötiloistaan huolimatta tällainen ovi täyttää kiinalaisen eristämättömän palo-oven standardin GB 12955-2008.



**Kuva 2.16.** Eristämättömän teräsoven UL 10 C –standardin mukaisen polttokokeen aikana mitatut pintalämpötilat oven kylmältä puolelta. Kuvaan on merkitty Euroopassa ja Yhdysvalloissa käytettyjen standardien määräämät lämpötilarajat. Punainen lämpötila kuvaa rakenteen keskimääräisen lämpötilan ylärajaa (140 °C yli ympäröivän huoneenlämmön) ja musta yksittäisen mittapisteen lämpötilan ylärajaa (180 °C yli ympäröivän huoneenlämmön). Muokattu lähteestä [32]

Teräsovien lämpöä eristävinä sisärakenteina voidaan käyttää esimerkiksi hunajakennorakennetta, polystyreeniä tai mineraalivillaa [33, 34]. Lämpöä kuitenkin johtuu eristyksestä huolimatta oven reunoilta, missä oven yhtenäinen teräshehys yhdistää polttokammion ja mittauspuolen toisiinsa. Teräksellä on hyvät ääneneristysominaisuudet, joten ydinaihion tarvitsee eristää pääasiassa vain lämpöä [21, s. 194].

Puu-pinta-aiset palo-ovet antavat sisätiloihin muita puuovia vastaavan ulkonäön ja pinnan ominaisuudet. Puiset palo-ovet ovat suhteellisen kevyitä ja pintamateriaali eristää suhteellisen hyvin lämpöä (lämmönjohtavuuskerroin noin  $0,16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ). Puuovien palo-ominaisuudet saadaan aikaan sekä pintakerroksen lämmöneristysominaisuuksilla että oven sisälle asetettavalla lämpöä eristävällä ja siten palon leviämistä hidastavalla kerroksella [35]. Pintamateriaali hiiltyy polttokokeen aikana, mikä hidastaa lämmönjohtumista, mutta se kuitenkin palaa lopulta kokeen aikana pinnasta ainakin osittain pois. Puun kosteuden ja kemikaalien kesto sekä puun huono hygieenisuus rajoittavat pinnoittamattoman puun käyttöä puhdastiloissa ja kosteissa olosuhteissa. Puiset palo-ovet ovat suhteellisen halpoja, mutta puun ääneneristysominaisuudet eivät ole kovin hyvät [9, s. 53]. Puun koinsidenssin rajataajuus on 7–100 mm levypaksuudella koinsidenssin rajataajuuden kannalta huonolla alueella kuvan 2.8 mukaisesti ja alle 7 mm levyn massa on liian alhainen riittävän vaimennuskyvyn aikaansaamiseksi. Tämän vuoksi puu ei tarjoa riittäviä

äänenvaimennusominaisuuksia eikä puuta tätä syystä juuri käytetä ääntä eristävissä rakenteissa. [9, s. 53]

Polymeerit palo-ovien pintakerroksena mahdollistavat ovien ominaisuuksien tarkemman räätälöinnin. Oven pinta voidaan maalata tai esimerkiksi laminoida jäljittelemään puupintaa. Polymeereillä saavutetaan myös puuhun verrattuna parempi kosteuden sekä kemikaalien kesto ilman, että tuotteen hinta tai paino nousee merkittävästi. Polymeerien alhainen lämmönkesto ja mekaaninen lujuus vaativat rakenteeseen erillisen lämpöä eristävän ja kuormaa kantavan ydinkerroksen. Kerroksen materiaalina käytetään yleisesti erilaisia keraameja niiden hyvien korkeiden lämpötilojen ominaisuuksien, riittävän mekaanisen lujuuden sekä alhaisen painon vuoksi. Polymeerisen pintamateriaalin mekaanisia ominaisuuksia pyritään lisäksi usein vahvistamaan kuitulujitteilla. Polymeerit eivät lommoonnu helposti ja ne ovat kevyitä. Polymeerisen pintakerroksen äänenvaimennuskyky riippuu paljon käytetystä polymeerityypistä.

## 2.2.2 Ydinaihio

Oven ydinaihio on oven tärkein osa. Sen tehtävänä on paitsi taata riittävä mekaaninen kestävyys ovelle, myös eristää lämpöä ja vaimentaa ääntä. Ydinaihio on fyysiseltä kooltaan oven suurin osa, jolloin sen tiheys ja hinta vaikuttavat oveen paljon. Lisäksi palo-oven sisämateriaalivalinnoilla on oleellinen osuus testausmenetelmien vaatimuksien täyttämiseksi. Tyypillisiä palo-ovissa käytettyjä ydinaihiota ovat keraamiset ja hunajakennoydinaihiot.

### *Keraamiset ydinaihiot*

Keraamiset materiaalit ovat usein matalatiheyksisiä materiaaleja, jotka koostuvat pääasiassa erittäin stabiileista yhdisteistä. Tämä johtaa korkeaan sulamispisteeseen sekä lämmönkesto. Keraamien mekaaniset ja lämmöneristysominaisuudet vaihtelevat sen sijaan merkittävästi eri keraamimateriaalien välillä.

Maaperästä löytyvien keraamiyhdisteiden hinnat ovat usein alhaisia ja niitä on helposti saatavilla. Monia tällaisia keraameja käytetään lämmöneristyksessä tai suodatusprosesseissa joko tiiviissä muodossaan tai vaahdotettuina.

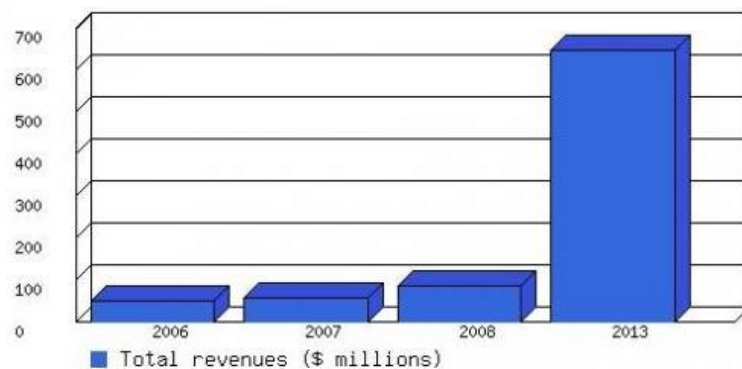
Kipsi-, lasivilla- tai kivivilla-pohjaisia materiaaleja käytetään laajasti lämmöneristyksessä. Kipsin suhteellisen korkea tiheys antaa sille hyvät ääneneristysominaisuudet, mutta sen lämmöneristysominaisuudet eivät riitä palo-oviapplikaatioihin. Villapohjaisilla eristeillä sen sijaan on korkea lämmöneristys- ja äänenabsorptiokyky, mutta niiden mekaaniset ominaisuudet ovat palo-oviapplikaation näkökulmasta riittämättömät.

Partikkelimuodossa esiintyvien vaahdotettujen keraamien edut ovat alhaisen tiheyden lisäksi korkea lämmöneristävyys. Toisistaan irrallaan olevat partikkelit ovat kuitenkin mekaanisilta ominaisuuksiltaan heikkoja eivätkä sovellu sellaisenaan oven kantavaksi kerrokseksi. Partikkelimuotoisia keraameja voidaan kuitenkin jatkokäsitellä

ja liittää irtonaiset partikkelit toisiinsa, jolloin rakenne muuttuu kiinteäksi ja samalla tiheämmäksi ja kestävämmäksi. Tämä toisaalta heikentää lämmöneristystä, koska rakenteessa olevien ilmakuplien määrä vähenee. Jäykkien mutta kiinteiden ja alhaisen tiheyden materiaalien ääneneristys on massalain ja absorptiosuhteen nojalla matala. Tämä vuoksi ääneneristysominaisuuksia parantamaan tarvitaan toinen materiaalikerrok.

Erilaisia keraamilevyjä yhdistelemällä voidaan aikaansaada rakenne, missä yhdistyvät riittävät mekaaniset ominaisuudet, alhainen paino sekä lämmön- ja ääneneristyskyky. Tämä voi johtaa myös kokonaiskustannusten alenemiseen, kun materiaalivaatimukset voidaan jakaa useammalle halvemmalle materiaalille.

Lämmöneristysten kannalta kiinnostava materiaalityyppi on aerogelit. Aerogelit ovat yleensä huokoisia keraamipohjaisia synteettisiä materiaaleja, joiden lämmöneristävyys on huippuluokkaa [36, 37] ja samalla tiheys on todella matala. Tällaisia materiaaleja kaivataan erityisesti rakennusteollisuudessa, missä aerogelit alkavatkin hiljalleen yleistyä. Kuvassa 2.17 on esitetty aerogelien myynnin kasvu vuosien 2006-2013 välillä.



**Kuva 2.17.** Aerogelien globaalien markkinoiden kehitys vuosien 2006-2013 välillä. [38]

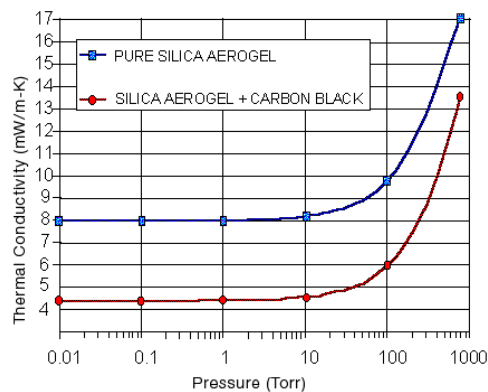
Aerogelin runkona toimii usein piidioksidi, mutta muitakin materiaalivehtoehtoja löytyy. Aerogelien maksimikäyttölämpötilat ovat usein noin 650-700 °C, jonka jälkeen aerogeliverkko alkaa sintrautua tai sulaa [39, 40]. Näitä aerogeelejä voidaan seostaa muihin materiaaleihin, kuten lasikuitumattoihin, jolloin tuotteen maksimilämpötilaa voidaan nostaa noin 1000 °C:een [39]. Maksimikäyttölämpötila riippuu kuitenkin paljon aerogelin runkorakenteen materiaalista, sillä jotkut aerogelit kestävät sellaisenaankin jopa 1000 °C:n pitkäaikaista altistusta [41].

Aerogelin korkea lämmöneristyskyky perustuu aerogelin kolmeulotteiseen rakenteeseen ja sen kykyyn estää ilman molekyylien vapaata liikettä. Aerogelikappale koostuu lukuisista ohuista säikeistä, jotka muodostavat kolmiulotteisen verkoston. Tämä verkosto sisältää paljon ”umpikujiin” päättyviä säikeitä, jolloin rakenteeseen päässyt lämpö joutuu kulkemaan mutkittelevan reitin rakenteen läpi. Aerogeliin muodostunut kolmiulotteinen verkosto muodostaa lisäksi kaasumolekyylien liikettä rajoittavia



mikrohuokosia. Mikäli aerogeeeliin muodostuneet mikrohuukokset ovat riittävän pieniä, törmäilevät aerogeelirakenteen sisälle jääneet kaasumolekyylit useammin aerogeeeliin kuin toisiin kaasumolekyyleihin. Tällöin kaasumolekyylien lämpöenergia siirtyy viereisen kaasumolekyylin sijaan heikosti lämpöä johtavaan aerogeelirakenteeseen. [42] Aerogeeelin lämmöneristävyys perustuu siis konvektion ja johtumisen minimointiin.

Lämmöneristävyttä voidaan edelleen parantaa pinnoittamalla aerogeeeli toisella materiaalilla. Kuvassa 2.18 on esitetty piidioksidiaerogeeelin lämmönjohtavuus ennen ja jälkeen hiilimustalla seostamisen. Kuvasta nähdään, että hiilimustan lisäys laskee lämmönjohtavuutta. Tämä johtui hiilimustan infrapunasäteilyä absorboivasta luonteesta, mikä muuttaa aerogeeelin vähemmän läpinäkyväksi infrapunaa aallonpituuksilla, jolloin aerogeeeli kykenee pysäyttämään infrapunasäteitä paremmin. [42] Infrapunasäteily absorboituu tällöin aerogeeeliin ja muuttuu lämmöksi. Lämpö pyrkii jälleen johtumaan mutkikkaan säierakenteen läpi. Hiilimustan vaikutus korostuu pienissä ilmanpaineissa ja korotetuissa lämpötiloissa, missä lämpöä siirtää pääasiassa lämpösäteily ja johtuminen. Lämmönjohtuminen kasvoi, kun ilmanpaine kasvoi. Tämä johtuu rakenteessa olevien kaasumolekyylien lämmönsiirto-ominaisuuksista.



**Kuva 2.18.** Piidioksidiaerogeeelin lämmönjohtavuus ennen ja jälkeen hiilimustalla seostamisen (9 paino-%). [42]

Mekaanisten ominaisuuksiensa vuoksi aerogeeelit eivät sovellu käytettäväksi sellaisenaan palo-oven pintalevyinä. Aerogeelien korkeat hinnat myös rajoittavat niiden käyttöä. Toisen materiaalin seostaminen aerogeelillä voisi tulevaisuudessa mahdollistaa aerogeeelin nykyistä laajemman käytön, kun aerogeeelin lämmöneristysominaisuudet saataisiin yhdistettyä nykyisin tarjolla olevien lasikuitumattojen lisäksi myös korkeissa lämpötiloissa mekaanisesti kestäviin komponentteihin. Tämä voisi myös nostaa tuotteen maksimikäyttölämpötilaa puhtaasta aerogelistä valmistettuun tuotteeseen verrattuna sekä auttaa kustannusten hallinnassa.

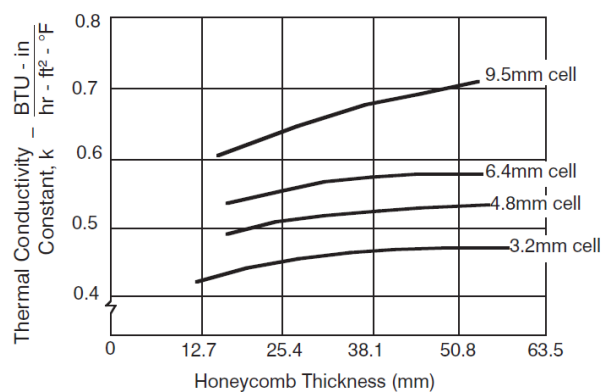
### **Hunajakennot**

Lämmöneristystä voidaan myös parantaa lisäämällä keraamilevyjen väliin ylimääräinen lämmöneristyskerros. Tämän kerroksen täytyy kuitenkin pystyä siirtämään voimia

keraamilevyjen välillä, jotta oven valmistaminen ja käyttäminen on ylipäättään mahdollista. Levyjen väliin voidaan asentaa kuormaa kantava ja voimia välittävä kevyt hunajakkenno, jonka sisälle asetetaan lämpöä eristävää ainetta. Tällöin oven rakenne muistuttaa sandwich-rakennetta, mikä takaa ovelle riittävän vääntöjäykkyyden sekä alhaisen painon [4].

Hunajakennon valmistusmateriaali vaikuttaa kuitenkin rakenteen ominaisuuksiin. Metalliset hunajakennot ovat lämmöneristysominaisuuksiltaan huonoja. Aramidipohjaiset hunajakennot ovat kohtuullisia lämmöneristeitä ja niillä on riittävät mekaaniset ominaisuudet huoneenlämmössä. Sekä metallisten että aramidipohjaisten hunajakennojen mekaaniset ominaisuudet alkavat heiketä noin 200 °C kohdalla. Suurempiin lämpötilankestoihin päästään vasta lentoteollisuuden käyttämien hunajakennojen yhteydessä, missä aramidi on korvattu polyimidillä. Tämä nostaa hunajakennon hintaa selvästi. [43]

Lämmönjohtuminen hunajakennossa tapahtuu metallisissa hunajakennoissa pääasiassa hyvin johtavaa metallia pitkin, kun taas orgaanisilla hunajakennotyypeillä tapahtuu lämmönjohtuminen pääasiassa ilman läpi johtumalla ja säteilemällä, sillä itse hunajakennomateriaali on heikosti lämpöä johtavaa [43]. Orgaanisten hunajakennojen lämmönjohtavuutta voidaankin siis räätälöidä kennokoon avulla. Pienemmät kennokoot estävät lämmenneen ilman liikkeen rakenteen sisällä, hidastaen konvektiota [44]. Kuvassa 2.19 on esitetty kennojen koon vaikutus lämmönjohtumiseen orgaanisessa hunajakennossa.

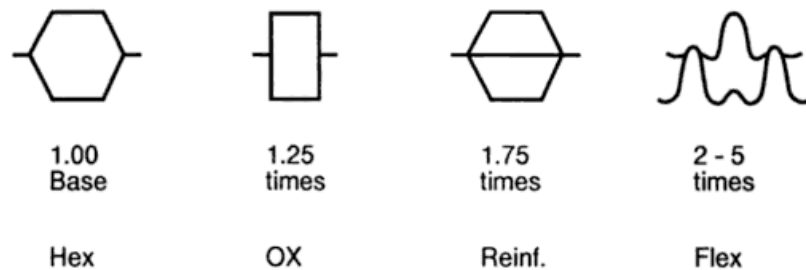


**Kuva 2.19.** Sisältä täyttämättömän aramidi-fenoli hunajakennon lämmönjohtavuus eri kokoisilla kennoilla. [44]

Hunajakennojen muoto vaikuttaa myös kennon ominaisuuksiin. Yleisimmin hunajakennot ovat kuvassa 2.20 esitetyn ”hex”-kuusikulmion muotoinen. Tällä rakenteella ei muodostaan huolimatta ole samat leikkauslujuudet ja -moduulit x- ja y-suuntiin valmistusprosessistaan ja hunajakennojen seinämien suuntauksesta johtuen. Valmistusprosessissa hunajakkenno kootaan liimaamalla taivutettuja levyjä päällekkäin kerros kerrokselta. Leikkausmoduulit ovat lähempänä toisiaan, kun heksagonaalinen

rakennetta venytetään, jolloin saadaan kuvan 2.20 ”OX” rakennetta muistuttava kenno. [43]

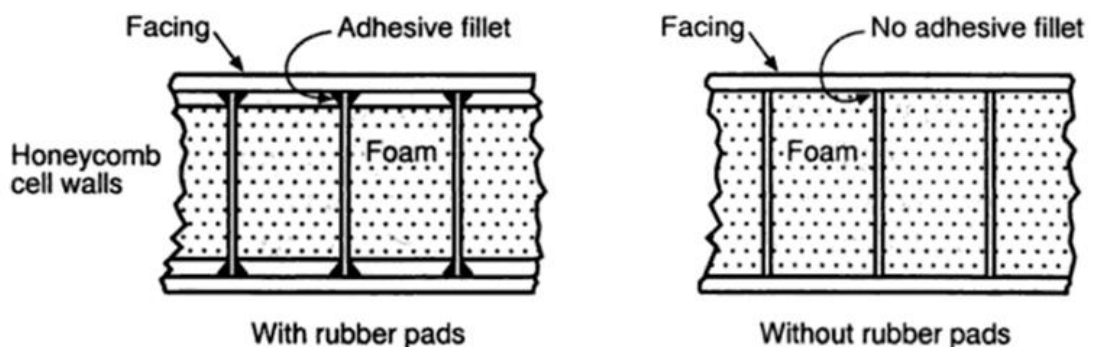
Erikoisempiakin hunajakennon muotoja on kehitetty. Näillä saavutetaan joitain etuja muihin kennoihin nähden, mutta hävitään toisaalla [43; 45, s. 18-20]. Kuva 2.20 esittää myös eri kennomuotojen suhteellista hintaa, missä vertailukohtana toimii kuusikulmioinen hunajakkenno.



**Kuva 2.20.** Eri hunajakennomuotojen vaikutus kennon suhteelliseen hintaan. [45, s. 41]

Hunajakennorakenteen lämmöneristystä voidaan parantaa täyttämällä kennot heikosti lämpöä johtavalla materiaalilla. Vastaavaa on onnistuneesti yritetty tiilirakentamisen yhteydessä [46]. Ei-metallisen täyttämättömän hunajakennon lämmönjohtavuus on luokkaa 0,10-0,12 W/(m\*K). Täyttämällä hunajakkenno lämpöä eristävällä materiaalilla voi lämmöneristys laskea lukemaan 0,04-0,06 W/(m\*K). [45, s. 34].

Hyöty lämmöneristyksessä voi olla suuri, mutta kennoston sisälle laitettavan eristeen tulee jättää riittävä väli hunajakennon reunoihin, jotta hunajakennon ja pintalevyjen välinen liimaus onnistuisi [45, s. 33]. Oikeaoppinen kennon täyttö on esitetty kuvassa 2.21.

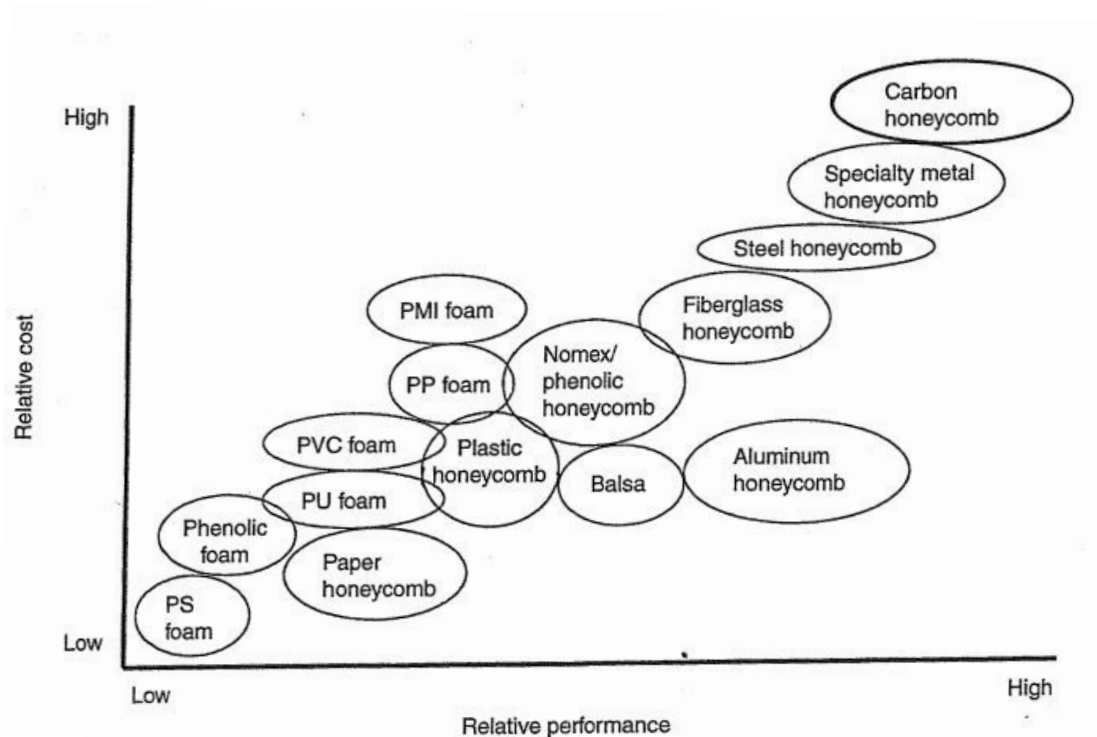


**Kuva 2.21.** Hunajakennon oikeaoppinen täyttö, jotta pintalevyjen liimaus onnistuu. [45, s. 33]

Kennoston sisällä oleva lämmöneriste ei juuri osallistu hunajakennon mekaanisten ominaisuuksien parantamiseen. Sen sijaan käyttämällä paksumpiseinäistä hunajakkennoa voidaan hunajakennon ja siten koko rakenteen ominaisuuksia parantaa huomattavasti

tehokkaammin. [45, s. 33] Kennojen koot eivät juuri vaikuta kennon mekaanisiin ominaisuuksiin [44].

Hunajakennon muodon lisäksi hunajakennojen hintaan vaikuttaa käytettävä materiaali, laatuvaatimukset, paksuuden toleranssit, käytetty polymeeri ja hunajakennon seinämäpaksuus eli tiheys. Halvin hunajakenko on valmistettu voimapaperista. Tällainen tuuman (25,4 mm) paksu hunajakenko maksaa  $1,5 \text{ €/m}^2$ , kun taas toisessa ääripäässä on hitsatut titaanihunajakennot, joiden hinta on noin  $5400 \text{ €/m}^2$ . Toistaiseksi kokeiluasteella olevat keraamiset hunajakennot maksavat noin  $22000 \text{ €/m}^2$ . [45, s. 40] Kuvassa 2.22 on esitelty eri hunajakennomateriaalien hinnan ja suorituskyvyn suhde.



**Kuva 2.22.** Hunajakennojen ja vaahtojen materiaalin vaikutus suorituskyykyyn ja hintaan. PMI=polymetakryyli-imidi, PP=poylpropyleeni, PVC=polyvinyylidikloridi, PU=polyuretaani, PS=polystyreeni. [47]

### 2.2.3 Palotiivisteet

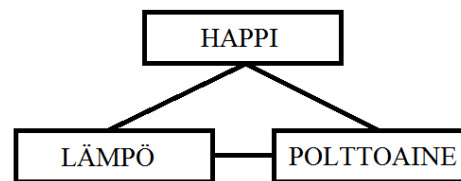
Palotiivisteet ovat palo-ovien tärkeä osa. Palotiivisteiden tehtävänä on estää palokaasujen, savun ja tulen leviämistä huoneiden välillä oven ja karmin välisistä raoista. Palotiiviste voidaan sijoittaa joko oven ulkoreunoille tai oven karmiin.

Palotiivisteet paisuvat lämmön vaikutuksesta, jolloin oven ja karmin väliin jääneet raot täyttyvät. Palotiivisteiden paksuus on yleensä vain muutama millimetri. Palotiivisteiden materiaaleina voidaan käyttää lämmön vaikutuksesta paisuvia grafiittipohjaisia polymeerilaminaatteja, jotka paisuvat palotilanteessa kooltaan 10-25

kertaisiksi ja tuhkautuvat. Paisuminen alkaa tuotteesta riippuen 150-300 °C välillä. Materiaalivalintaan ja palotiivisteiden asennuspaikkaan vaikuttaa muun muassa ovensa käytetty materiaali, sillä eri tuotteet aiheuttavat eri määrän voimaa paisuessaan ja paisumisen alkamislämpötila vaihtelee. Palotiivisteiden päällemaalaus ja muu pinnoittaminen on palotiivistekohtaista ja tulisi aina varmistaa palotiivisteiden valmistajalta. [48, 49, 50, 51, 52]

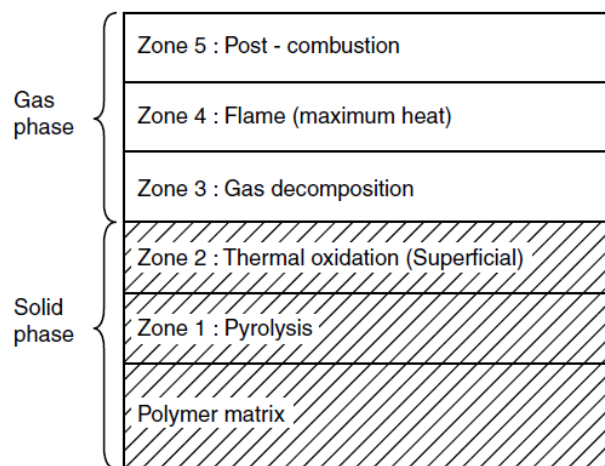
### 3 POLYMEERIEIN PALAMINEN

Polymeerit koostuvat pääosin hiili- ja vetyatomeista, eli toisin sanoen kemiallisten komponenttiensa vuoksi polymeerit voivat palaa. Polymeerien palaminen vaatii myös lämpöä ja hapettimen, jona yleensä toimii ilman happi [53, s. 2; 54, s. 101]. Nämä vaatimukset muodostavat yhdessä kuvassa 3.1 esitetyn palokolmion, jonka jokainen osa on välttämätön palon mahdollistamiseksi.



**Kuva 3.1.** Palokolmio. Muokattu lähteestä [53, s. 2]

Polymeerien palaminen tapahtuu polymeerin pinnalla, missä palon mahdollistamiseksi tapahtuu useita kemiallisia reaktioita. Polymeerin pinta voidaan jakaa näiden kemiallisten reaktioiden avulla viiteen eri alueeseen kuvan 3.2 mukaisesti.



**Kuva 3.2.** Polymeerin palamisen eri alueet. [55, s. 5-4]

Kuvan 3.2 viisi paloon osallistuvaa aluetta sijaitsevat kaikki kemiallisesti muuttumattoman polymeerimatriisin yläpuolella. Kuvassa 3.2 on alueeksi yksi nimetty se pyrolyysialue, missä lämmön avulla tapahtuu polymeerin endotermistä kemiallisten sidosten katkeamista eli termistä hajoamista. Terminen hajoaminen alkaa yleensä 150-200 °C lämpötilassa [56, s. 763]. Terminen hajoaminen voi tarkoittaa joko pääketjun

päässä tapahtuvaa ketjun hajoamista, missä vapautuu pieniä meerejä (end-chain scission), pääketjun satunnaisessa kohdassa tapahtuvaa ketjun katkeamista (random chain scission) tai pääketjuun kiinnittyneiden sivuryhmien katkeamista (chain stripping) [53, s. 6-7]. Kuitenkaan tässä lämpötilassa ei vielä tapahdu hapettumista [54; 55, s. 5-4].

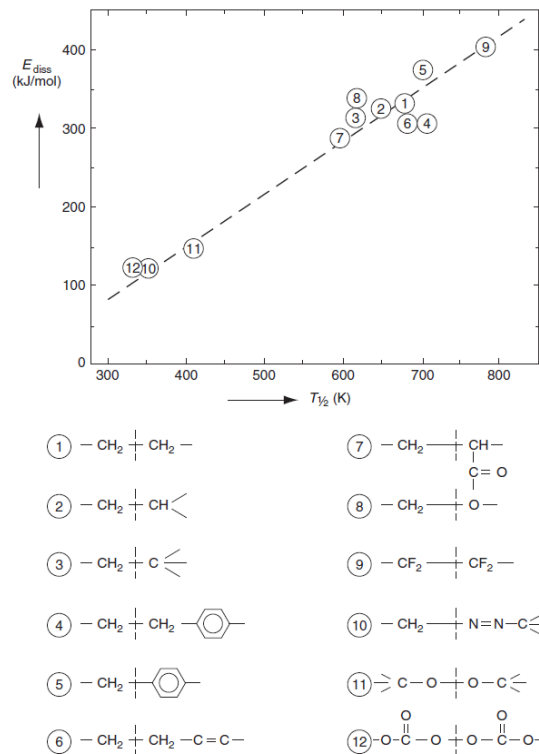
Alue kaksi on riittävän lähellä pintaa, jolloin korkeamman lämpötilan ja hapen vaikutuksesta tapahtuu pinnan hapettumista. Tällä alueella polymeeriketjut jatkavat pilkkoutumistaan ja polymeeriketjusta irronneet ogliomeerit siirtyvät kohti polymeerin pintaa ja pinnasta edelleen kaasufaasiin. Tämä polymeerin pinnalla sijaitseva alue kolme on kaasufaasi, missä polymeerin sisältä siirtyvät ogliomeerit hapettuvat tai hajoavat kaasufaasissa sijaitsevan hapen tai vapaiden radikaalien avustuksella ja siirtyvät edelleen alueelle neljä. [55, s. 5-4]

Alueella neljä ogliomeerien konsentraatio on riittävä liekin kehittymiseksi ja kasvamiseksi. Tällä alueella tapahtuu valtaosa polymeerin palamisesta, jonka vuoksi myös liekki saavuttaa maksimilämpötilansa. Polymeerin palamisen aiheuttama näkyvä liekki syntyy tällä alueella. [55, s. 5-4]

Alue viisi sijaitsee kauimpana polymeerin pinnasta. Tällä alueella hapettumisreaktiot loppuvat ja palotuotteiden konsentraatio on suurin. Alueiden neljä ja viisi tuottama lämpöenergia mahdollistaa polymeerin alemmissa kerroksissa tapahtuvan polymeeriketjun lämpötilan nousun ja hajoamisen. [55, s. 5-4]

Polymeerin palaminen vaatii kolme päävaihetta: polymeeriketjun termisen hajoamisen, palavien tuotteiden muodostumisen ja siirtymisen polymeerin pinnalle sekä palavien tuotteiden korkean lämpötilan hapettumisen polymeerin pinnalla olevassa liekissä. Yhden tai useamman kolmen päävaiheen toiminnan heikentyessä heikentyy samalla koko polymeerin palaminen. [55, s. 5-4]

Polymeerin palamisprosessi alkaa yleensä ulkoisen (säteily, konvektio tai johtuminen) tai sisäisen (kemiallinen reaktio, kuten hapettuminen tai käyminen) lämpölähteen tai palamisreaktion eksotermisyyden aiheuttamalla polymeerin lämpötilan nousulla. Polymeerin lämpötilan noustessa tapahtuu yleensä polymeeriketjun sidosten katkeamista. Polymeeriketjun rakenne vaikuttaa polymeeriketjun hajoamislämpötilaan kuvan 3.3 osoittamalla tavalla. Suuremman dissosiaatioenergian omaava polymeeriketju vastustaa pääketjun hajoamista enemmän ja täten hidastaa polymeeriketjusta irtoavia ja samalla palon mahdollistavien pienien molekyylien muodostusta alhaisen dissosiaatioenergian polymeereihin verrattuna. Polymeerin termistä pysyvyyttä voidaan parantaa kasvattamalla kiteisyysastetta, ristisilloittamalla polymeeriketjuja, kasvattamalla polymeeriketjun inherenttiä jäykkyyttä sekä poistamalla termisen hajoamisen tai hapettumisen kannalta heikkoja lenkkejä. Näistä tehokkaimmat keinot ovat pääketjun jäykistäminen sekä heikkojen lenkkien poistaminen. [55, s. 5-2]

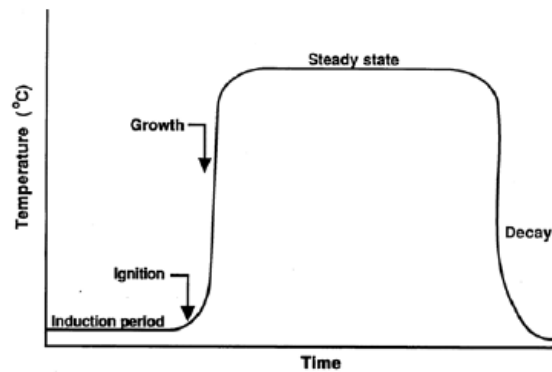


**Kuva 3.3.** Polymeeriketjun heikoimpien sidosten dissosiaatioenergian vaikutus siihen pyrolyysilämpötilaan, missä polymeerin lopullisesta painon laskusta on tapahtunut puolet. [56, s. 766]

### 3.1 Polymeerien palon vaiheet

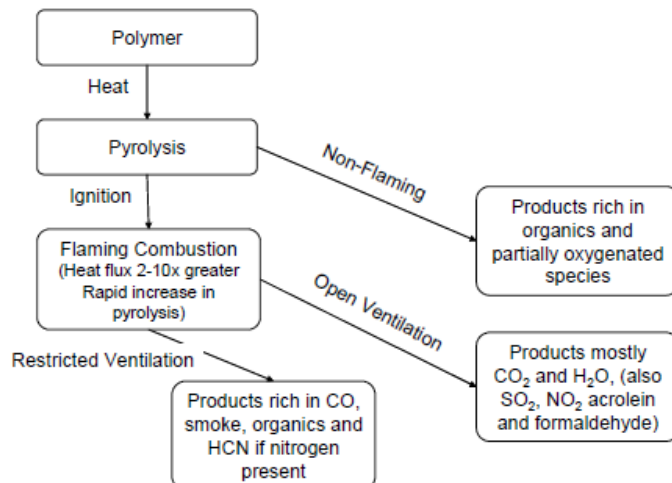
Polymeerien palo tapahtuu useassa eri vaiheessa, jotka on havainnollistettu kuvassa 3.4. Ensimmäinen vaihe on induktiovaihe, missä polymeeriketjusta katkenneet pienet molekyylit voivat diffundoitua polymeeriä ympäröivään ilmaan. Nämä molekyylit muodostavat yhdessä hapen kanssa syttyvän seoksen. Seos syttyy, kun joko itsesyttymislämpötila tai leimahduspiste saavutetaan. Itsesyttymislämpötilalla tarkoitetaan lämpötilaa, johon lämmitettyään materiaali syttyy itsestään palamaan ja jatkaa palamista ilman ulkoista lämmönlähdettä. Leimahduspiste on lämpötila, jossa materiaalista haihtunut kaasuseos syttyy ulkoisen energialähteen (kipinä, liekki) avulla ja jatkaa palamistaan, vaikka ulkoinen energianlähde poistettaisiin. Palo kasvaa tämän jälkeen nopeasti ja jatkuu niin kauan kun happea ja palamatonta polttoainetta on saatavilla.





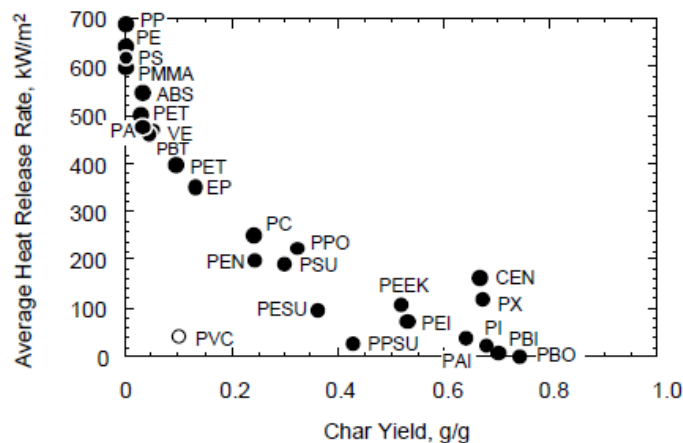
**Kuva 3.4.** Polymeerien palon vaiheet. [53, s. 3]

Polymeerin palamisen aikana syntyneet palokaasut riippuvat voimakkaasti palo-olosuhteista sekä poltettavasta polymeeristä. Tiettyjen polymeerien pääketju tai sivuryhmät voivat palaessaan aiheuttaa myrkyllisiä tai syövyttäviä kaasuja. Lisäksi palolämpötila sekä käytettävissä oleva happi vaikuttavat palotuotteisiin. Kuvassa 3.5 on esitetty palon eri vaiheissa syntyvät palokaasut ja hapen vaikutus niihin. Yleisesti voidaan todeta, että korkeampi palolämpötila ja hapen konsentraatio johtaa puhtaampaan palamiseen ja turvallisempiin palotuotteisiin. Epäpuhdas palaminen johtaa myrkyllisiin palokaasuihin, kuten hiilimonoksidiin ja vetysyanidiin, ja savuun, jotka ovat merkittävimmät syyt palokuolemiin rakennuspaloissa. [53, s. 8]



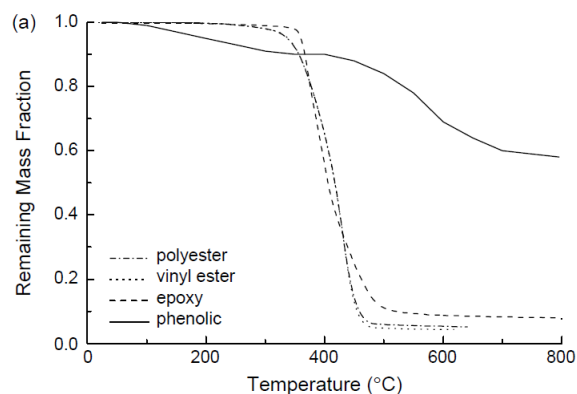
**Kuva 3.5.** Palovaiheen vaikutus palokaasuihin. [53, s. 8]

Palon aikana polymeerin pinnalle voi syntyä lämpöä ja kaasunvaihtoa eristävä kerros, mikä hidastaa polymeerin palamista. Orgaanisilla polymeereillä kerros muodostuu useimmiten karstasta, kun taas epäorgaanisilla polymeereillä muodostuu rakenteen pintaan keraaminen pinta. Kuvassa 3.6 esitetään tiettyjen polymeerien karstanmuodostumistaipumus (char yield) ja sen vaikutus palon aikana polymeeristä vapautuneeseen keskimääräiseen lämmönmuodostusnopeuteen (Average Heat Release Rate). Kuvasta nähdään, että suuremman karstakerroksen muodostavien polymeerien palotilanteessa vapauttama lämpöenergia on matalampi.



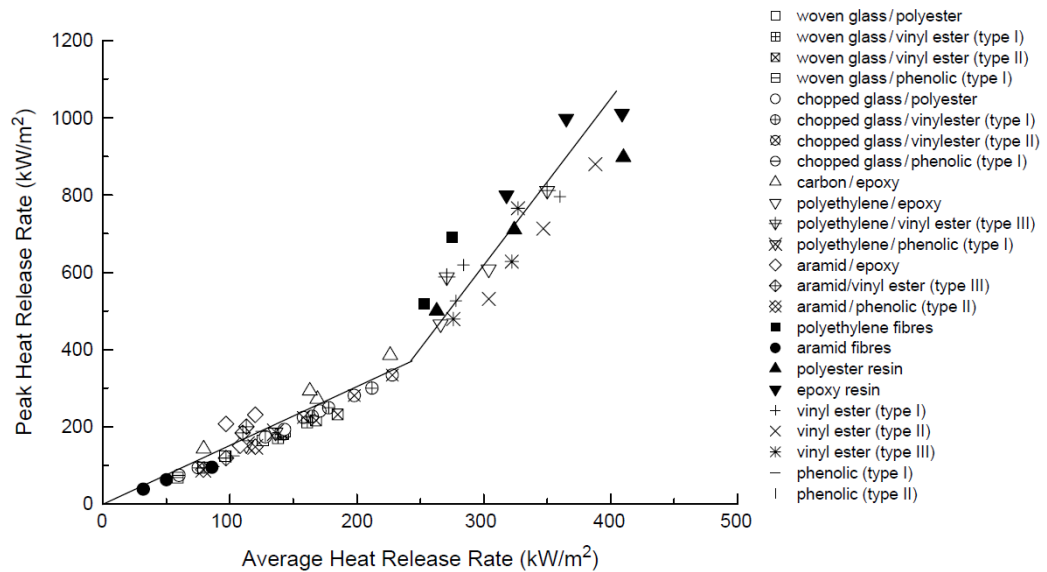
**Kuva 3.6.** Eri polymeerien palossa vapautuva lämmönmuodostusnopeus ja karstanmuodostumistaipumus. [57, s. 1]

Karstanmuodostumistaipumusta voidaan arvioida polymeeriketjun rakenteen avulla käyttäen Van Krevelenin karstanmuodostumistaipumusteoriaa vuodelta 1975. Jokaisella pääketjun rakenneosalla on oma tyypillinen tapansa vaikuttaa karstanmuodostukseen. Tämä johtuu rakenneosien kemialliseen stabiilisuuteen sekä niiden mahdollisuuksiin luovuttaa paloa edistäviä komponentteja. Esimerkiksi alifaattiset ketjut yhdistettynä aromaattisiin renkaisiin huonontavat aromaattisten renkaiden karstanmuodostuskykyä luovuttamalla niille vetyatomeja. Mikäli aromaattiseen renkaaseen on liittynyt neljä vetyatomia korvaavaa sivuryhmää nousee tämän yhdisteen karstanmuodostuskyky selvästi, kun vetyatomit eivät pääse vaikuttamaan palotapahtumaan. [56, s. 772] Kuvassa 3.7 on esitetty neljän yleisen kertamuovin karstanmuodostus lämpötilan funktiona. Kuvasta nähdään, että fenolin alkuperäisestä massasta noin 60 % muuttuu karstaksi, kun muilla polymeereillä karstaksi muuttuu noin 10 %. Tämä selittyy fenolin poikkeavalla kemiallisella rakenteella. Fenolissa on lukuisia aromaattisia renkaita ja pieni vetymäärä, joka johtaa Van Krevelen teorian mukaisesti korkeaan karstamäärään.

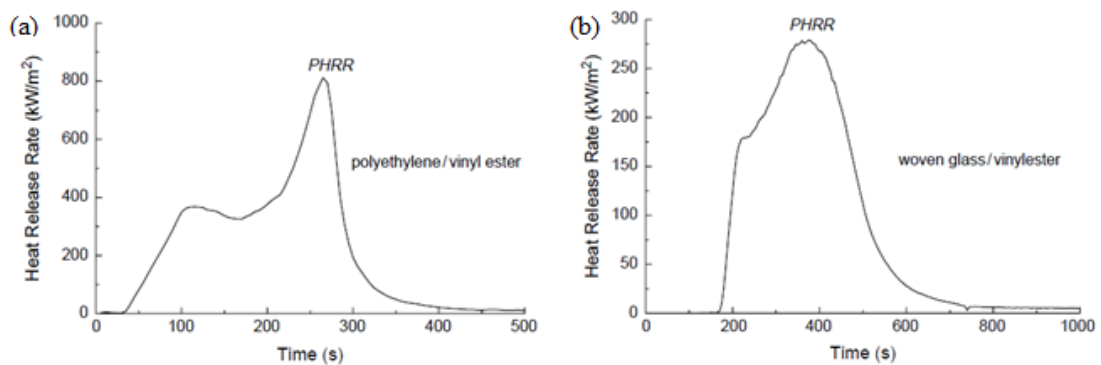


**Kuva 3.7.** Neljän kertamuovin karstanmuodostus lämpötilan funktiona mitattuna kartiokolorimetrissä. [58]

Verrattaessa palotilanteessa vapautunutta lämpöä eri materiaalien kesken huomataan jälleen, että polymerin muodostama karstakerros alentaa polymerin vapauttamaa lämpöenergian määrää. Kuva 3.8 näyttää sekä pelkkien kertamuovien että komposiittien lämmönmuodostumisen tilanteessa, missä näytteitä lämmitetään teholla  $50 \text{ kW/m}^2$ . Heikosti ja helposti palavien kertamuovien ero pienenee, kun kertamuovin joukkoon seostetaan palamatonta materiaalia, esimerkiksi eri muodoissa olevaa lasikuitua. Mikäli seostetaan palavaa materiaalia, kuten polyeteeniä, muuttuu palokäyttäytyminen merkittävästi, kuten kuvasta 3.9 nähdään. Lämpökäyrän alun nopea hyppäys johtuu polyeteeni-lujitekuitujen syttymisestä, mikä tapahtuu matriisimateriaalina toimivaa vinyliesteriä matalammassa lämpötilassa.

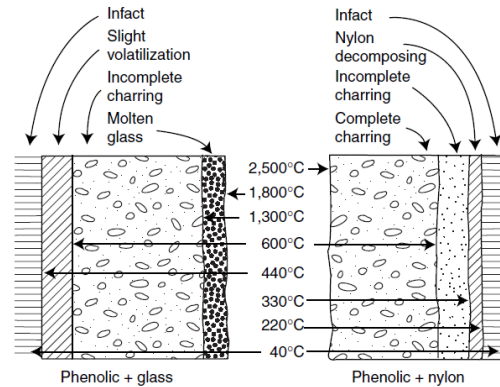


**Kuva 3.8.** Eri kertamuovien ja polymeerikomposiittien palon aikainen keskimääräinen ja maksimilämmönmuodostusnopeus, kun näytteitä lämmitetään teholla  $50 \text{ kW/m}^2$ . [58]



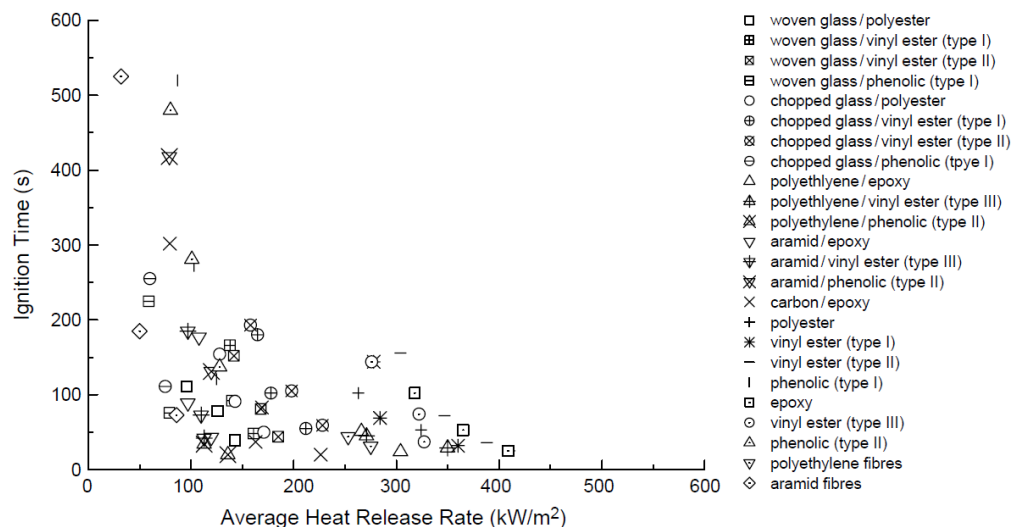
**Kuva 3.9.** Tyypillinen lämmönmuodostuskäyrä polymeerikomposiitille, jossa lujitekuitu on palava (a) ja palamaton (b). Matriisimateriaalina toimii molemmissa tapauksissa vinyliesteri. Palavana lujitekuituna toimii korkean molekyylipainon polyeteeni (UHMW-PE) ja palamattomana lujitekuituna lasikuitu. Mittaus suoritettu kartiokolorimetrissä, missä näytteitä lämmitetty teholla  $50 \text{ kW/m}^2$ . [58]

Palokäyttäytymisen muutos johtuu näytteen pintaan muodostuvista erilaisista lujitekuitukerroksista. Palamaton lujitekuitu toimii lämmöneristeenä ja samalla se hidastaa polymeerin pinnalla tapahtuvaa kaasujen vaihtoa. Kuvassa 3.10 on esitetty kahden fenolipohjaisen komposiitin lämpötilajakauma tasaisessa lämmityksessä. Kuvasta huomataan, että nylonilla vahvistettuun fenoliin ei synny lämpöä eristävää kerrosta rakenteen päälle.



**Kuva 3.10.** Lämpötilajakauma kahdessa eri muovikomposiitissa tasaisessa lämmityksessä. Vasemmalla on fenolin ja lasikuidun muodostama komposiitti, oikealla on fenolin ja nylonin muodostama komposiittiseos. [55, s. 1-70]

Polymeerin palamisen eräs tärkeä asia on polymeerin syttymisnopeus. Kuvassa 3.11 on esitetty eri kertamuovien sekä niistä valmistettujen komposiittimateriaalien syttymisnopeus ja sen suhde keskimääräiseen lämmönmuodostukseen. Paloneston kannalta parhaat materiaalit löytyvät vasemmasta ylänurkasta. Heikoimmat taas oikeasta alakulmasta. Palamisen aikana vapautuvan energian määrällä ja syttymisnopeudella ei ole selkeää korrelaatiota. Kuitenkin kuten aiemmin, polymeerin seostaminen palamattomalla lujitteella pienentää matriisimateriaalien välisiä eroja.



**Kuva 3.11.** Eri kertamuovien syttymisajan ja palonaikaisen keskimääräinen lämmönmuodostumisnopeus [58]

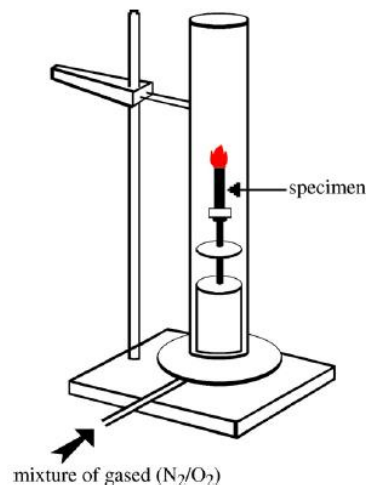
## 3.2 Palotestaus ja –luokitukset

Polymeerien palamiseen vaikuttaa useat eri tekijät, minkä vuoksi yhdenkään yksittäisen testin avulla ei saavuteta täydellistä käsitystä polymeerin palokäyttäytymisestä vaan eri kokeita tulisi suorittaa kokonaisvaltaisen käsityksen saamiseksi. [55, s. 5-4] Eri testimenetelmillä saatuja tuloksia on kuitenkin vaikea vertailla toisiinsa eikä laboratorioissa vielä osata luotettavasti simuloida todellisia palotilanteita, missä palavan huoneen muodot, palon sijainti huoneessa, ilmanvaihto ja huoneessa olevan palavan materiaalin määrä vaikuttavat merkittävästi paloon [53, s. 2-6]. Eri testimenetelmillä saadut tulokset voivat olla jopa keskenään ristiriidassa. [54]

### 3.2.1 LOI-indeksi

Standardien ASTM D-2863 ja ISO 4589 mukainen LOI-koejärjestely (Limited Oxygen Index) pyrkii kuvaamaan eri polymeerityyppien välistä suhteellista syttymisherkkyyttä. Kokeessa määritetään alin happipitoisuus  $O_2/N_2$ -seoksessa, joka ylläpitää palamista kolme minuuttia tai kuluttaa pystysuoraan asetetusta näytteestä viiden senttimetrin mittaisen palan, kun näyte on sytytetty yläpäästään palamaan. [54]

ISO 4589 –standardin mukaisesti näyte ( $80 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ ) asetetaan pystyyn pystysuoraan putkeen, missä valittu kaasuseos virtaa alhaalta ylöspäin. Virtauksen tasaannuttua ja putken sisäisen kaasuseoksen asetuttua tasapainoon näyte sytytetään yläpäästään kuvan 3.12 mukaisesti palamaan. Tällä mittausmenetelmällä voidaan määrittää alin happipitoisuus, jolla kyseinen näyte pystyy ylläpitämään palamista.



**Kuva 3.12.** Standardin ISO 4589 mukainen mittausjärjestely. [54]

Ilmakehässä on keskimäärin 21 til.-% happea. Normaalitilanteessa polymeeri sammuisi itsestään, jos se vaatisi yli 21 til.-% happea palon ylläpitämiseksi. Kuitenkin LOI-testissä virtaava kaasuvirta estää konvektiolla tapahtuvan polymeerin lämpenemisen, jonka vuoksi yleisesti itsestään sammuviksi polymeereiksi lasketaan

vasta polymeerit, jotka ylittävät 27 til.-% rajan LOI-testissä. [56, s. 5-5] Taulukossa 3.1 on esitetty joidenkin polymeerien LOI-arvot.

**Taulukko 3.1. Polymeerien LOI-arvoja. [55, s. 5-5]**

Non-Self-Extinguishing Polymer	LOI	Self-Extinguishing Polymer	LOI
Polyoxymethylene	16	Polycarbonate	27
Polyethylene	17	Polyarylate	34
Polypropylene	18	Polyethersulfone	38
Polystyrene	18	Polyether ether ketone	40
Poly(methyl methacrylate)	18	Poly(vinyl chloride), rigid	42
Polyisoprene (natural rubber)	18	Polyamide-imide	43
ABS	18	Poly(phenylene sulfide)	44
Nylon-6,6	24	Polyether-imide	47
Poly(ethylene terephthalate)	25	Polypyromellitimide	50
Polychloroprene	26	Poly(vinylidene chloride)	60
		Polytetrafluoroethylene	95

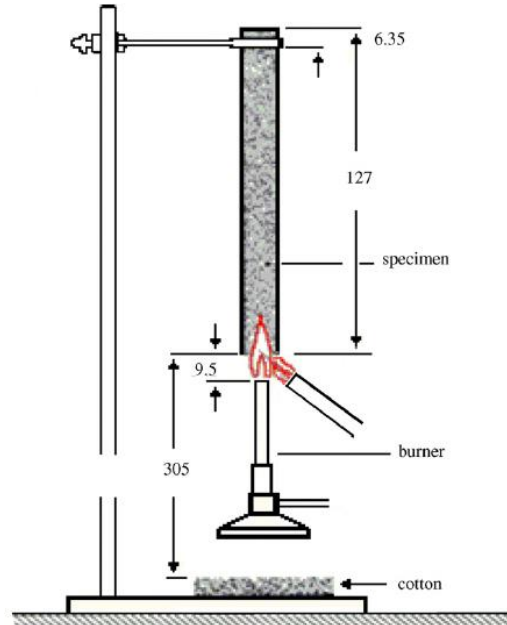
LOI-indeksi on edelleen yksi tärkeimmistä muoviteollisuuden seulonta- ja laaduntarkkailumenetelmistä, vaikka perusteellisempiakin menetelmiä on kehitetty [54]. Polymeerien LOI-arvot muuttuvat ympäröivän lämpötilan mukaan. Huoneenlämmössä itsestään sammuva polymeeri voi palaa korotetussa lämpötilassa sammumatta. Myös polymeeristä tippuvat pisarat voivat muuttaa LOI-mittauksen tuloksia, nimittäin sulava ja polymeerin pinnasta tippuva polymeeri vie liekkiä ja samalla poltettavaa materiaalia pois mitattavasta näytteestä, mikä voi johtaa näytteen sammumiseen ja liian korkeaan LOI-arvoon. [54] Todellisuudessa nämä palavat pisarat voivat laajentaa paloa [53, s. 1]. Tätä ei kuitenkaan LOI-testissä huomioida, vaan tätä varten tarvitaan muita standardeja [54].

### 3.2.2 UL 94 –luokitus

UL 94 on Underwriters Laboratories –nimisen turvakonsultointi ja sertifiointiyrityksen luoma polymeerien paloluokitusstandardi. Tämä standardi kattaa usean erilaisen testin, missä testattavan kappaleen asento muuttuu vaakatason ja pystysuoran välillä. Käytetyin näistä testeistä on UL 94 V –testi, missä tarkastellaan pystysuorassa olevan kappaleen syttyvyyttä ja liekin leviämistä, kun näyte on altistettu pienitehoiselle liekille [54, 59]. UL 94 V –mittauksen mittauslaitteisto on havainnollistettu kuvassa 3.13.

UL 94 V –testissä näytteen pituus on 127 mm ja leveys 13 mm. Näytteen paksuus on maksimissaan 13mm. Palo etenee kuitenkin helpommin ohuempaa näytettä pitkin, joten UL 94 –luokituksen tulos on voimassa vain mitatun näytteen paksuisille ja sitä paksummille näytteille [60]. Yleensä käytetään paksuuksia 0.8 mm ja 1.6 mm [61, s. 17]. Näyte kiinnitetään yläpäästään kiinni ja sen alle asetetaan liekki. Liekin annetaan olla paikallaan 10 sekunnin ajan, jonka jälkeen liekki poistetaan ja näytteen sammumisaika mitataan. Mikäli näytteestä tippuu pisaroita, voidaan liekki kääntää 45° kulmaan ja siten näytteen alta pois. Alle 10 sekunnin sammumisaika riittää parhaimpaan V-0 luokitukseen. Mikäli näytteen sammuminen kestää alle 30 sekuntia eikä palavia pisaroita tipu, on luokitus V-1. Mikäli näytteen sammuminen kestää alle 30 sekuntia,

mutta palavia pisaroita tippuu, on luokitus V-2. Mikäli näyte ei täytä näitä vaatimuksia, mutta palamisnopeus vaakatasoon asetetussa näytteessä on alle 76 mm/min alle 3 mm paksuisella kappaleella, saa näyte luokitukseen HB. Taulukossa 3.2 on esitelty muutaman yleisen polymeerin UL 94 V ja LOI-luokitukset.



**Kuva 3.13.** UL 94 V mittausjärjestely [54]

**Taulukko 3.2.** UL 94 –luokitukset yleisimmille polymeereille. Taulukkoon on kerätty vertailun vuoksi myös vastaavien polymeerien LOI-arvot.

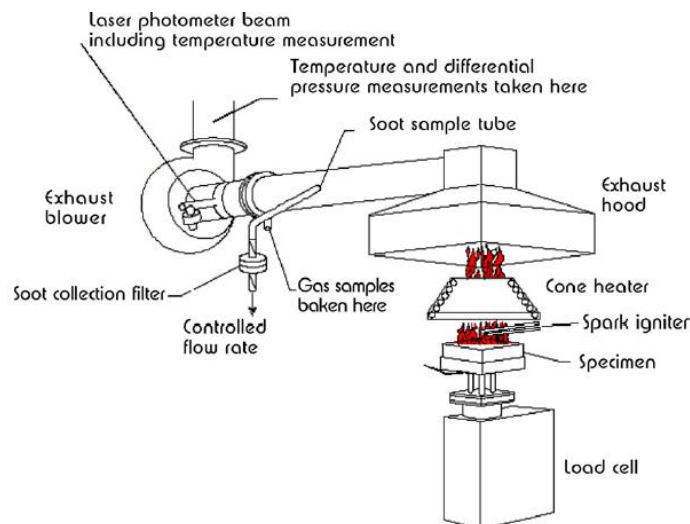
Polymeeri	LOI [%]	UL 94	Lähde
HDPE	17	HB	62
LDPE	17	HB	62
PP	17	HB	55, s. 5-5; 57
PS/HIPS	18	HB	62
PMMA	17-19	HB	55, s. 5-5; 57
ABS	18-19	HB	55, s. 5-5; 57
PET	20	HB	57
Nylon 6,6	24	HB/V2	55, s. 5-5; 57; 63
PC	25	V2	55, s. 5-5; 57
Palosuojattu HIPS	28	V2/V0	57, 62
Palosuojattu ABS	30	V2/V0	57, 62
PEEK	35-40	V0	55, s. 5-5; 57; 60
PAI	43-45	V0	55, s. 5-5; 57; 61
Jäykkä PVC	45	V0	57
PVdC	60	V0	55, s. 5-5; 62
PTFE	90-95	V0	55, s. 5-5; 57



LOI- ja UL 94 –tulokset ovat pääsääntöisesti keskenään linjassa. Alle 21 til.-%:n LOI-arvojen materiaalit saavat UL 94 –standardilla mitattuna vain HB-luokituksen, kun taas 27 til.-% LOI-arvojen materiaalit saavat jo V0-luokituksen UL 94 –testimenetelmällä. Näytteestä voi kuitenkin tippua palavia pisaroita UL 94 –testin aikana, jolloin LOI- ja UL 94 –testien tulokset eivät ole keskenään vertailukelpoiset [64, s. 695].

### 3.2.3 Kartiokalorimetri

Kartiokalorimetri on LOI- ja UL 94 V –testejä monimutkaisempi, mutta samalla enemmän tietoa tarjoava menetelmä. Kartiokalorimittauksesta on olemassa sekä kansainvälinen standardi ISO 5660 että Yhdysvalloissa käytössä oleva ASTM E 1354. Kartiokalorimetrin mittauslaitteisto on havainnollistettu kuvassa 3.14. Testi perustuu näytteen altistamiseen ulkopuoliselle lämpösäteilylle, näytteestä haihtuvien kaasujen sytyttämiseen kipinällä ja näytteen palamisesta vapautuneiden palokaasujen mittaamiseen. [54]



**Kuva 3.14.** Kartiokalorimetrin koelaitteisto ja mittausmenetelmä. [54]

Kartiokalorimetrimittauksessa näytettä lämmitetään teholla 10-100 kW/m<sup>2</sup> ja samalla kappaleesta irtoaa kaasuja, jotka sytytetään palamaan näytteen yläpuolella olevan kipinän avulla. Palokaasut johdetaan näytteen yläpuoliseen hormiin, missä palokaasuista mitataan hapen, hiilimonoksidin ja hiilidioksidin konsentraatiot sekä palosta vapautuneen savun paksuus. [54] Näytteen pinta-ala on vakio 100\*100 mm<sup>2</sup>, mutta näytteen korkeus voi vaihdella. Näytteen maksimikorkeus on 50 mm. [65] Näytteen painon muutosta seurataan palon aikana voimasellillä [54].

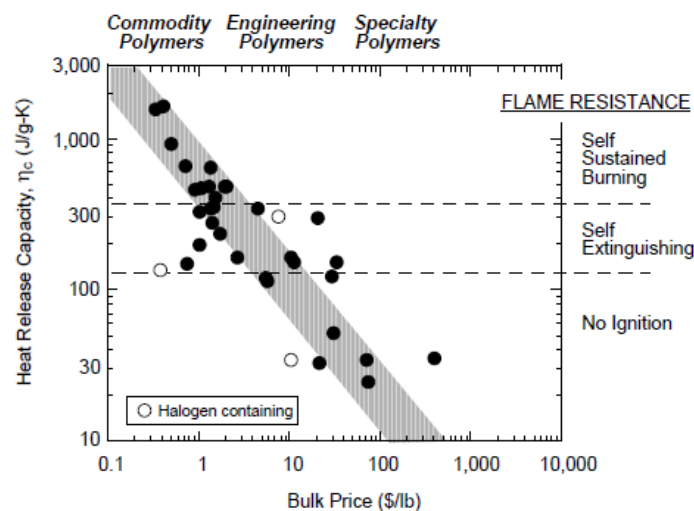
Kartiokalorimetrillä saadaan selville näytteestä vapautunut lämpöenergia ajan funktiona käyttäen hyödyksi Huggett'in keksintöä, jonka mukaan palossa vapautunut lämpöenergia korreloi käytetyn hapen määrän kanssa [66]. Mittauksesta selviää myös syttymiseen kulunut aika (time to ignition – TTI), näytteen palamiseen kulunut aika (time of extinction – TOF), massan muutos palon aikana, sekä muodostuneen hiilimonoksidin, hiilidioksidin sekä savun määrä (total smoke released – TSR) [54].



## 4 POLYMEERIEEN PALONESTO

Polymeerien alhainen lämmönkesto ja paloherkkyys ovat polymeerien yksi heikoimmista ominaisuuksista. Palo-ominaisuudet ovat erittäin tärkeässä asemassa monissa nykyajan sovelluksissa käyttäjäturvallisuuden sekä palossa vapautuvien palokaasujen vuoksi. Tämän vuoksi polymeerien palo-ominaisuuksiin kiinnitetään entistä enemmän huomiota.

Kuvasta 4.1 nähdään polymeerien palo-ominaisuuksien ja hinnan välinen korrelaatio. Yleismuovien (hinta <1 €/kg) käyttö kattaa 95 % kaikesta polymeerien käytöstä. [57, s. 1] Nämä polymeerit ovat usein helposti palavia. Tämän vuoksi polymeerien palonestoa on pyritty kasvattamaan lisäaineita käyttämällä, jotta kalliimpien polymeerien käyttöä voidaan välttää.



**Kuva 4.1.** Polymeerien hintojen ja palo-ominaisuuksien vertailua. [57, s. 1]

Polymeerien paloneston tavoitteena on häiritä kappaleessa kolme kuvattua polymeerin palamisprosessia. Palonesto voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla. Voidaan valita inherentisti palamaton polymeeri, seostaa palonestoaineita polymeerimatriisiin tai syntetisoida palonestoaineyhdisteitä osaksi polymeeriketjua tai pinnoittamalla valmis tuote palonestoaineilla [67]. Pinnoitukseen käytetyt palonestoaineet aiheuttavat tuotteen pinnalle hiiltyneen kerroksen, mikä eristää lämpöä ja estää helposti syttyvien yhdisteiden pääsyn polymeerin pinnalle. Polymeeriseokseen seostetut tai osaksi polymeeriketjua syntetisoidut palonestoaineet hidastavat palon etenemistä joko fyysisesti tai kemiallisesti. [68]

## 4.1 Fysikaalinen palonesto

Fysikaalisella palonestolla tarkoitetaan palonestoa, mikä hidastaa paloa vähentämällä palon lämpötilaa, heikentäen polymeerin pinnalla kaasufaasissa tapahtuvia paloa edistäviä reaktioita tai muodostamalla polymeerin pinnalle palolta suojaavan kerroksen. Kyseessä on yleensä palonestoaineen korotetussa lämpötilassa tapahtuva endoterminen hajoaminen, mikä jäähdyttää palavaa materiaalia. On kuitenkin huomattava, että polymeerin prosessointilämpötila ei saa ylittää tällaisen fysikaalisen palonestoaineen aktivoitumislämpötilaa, mikä yleensä on välillä 200 – 300 °C. [54]

Hajoamistuotteena voi olla jonkin inertin kaasun, kuten hiilidioksidin, ammoniakkin tai vesihöyryn, muodostuminen. Vapautuneet kaasut alentavat polymeerin pinnalla olevan kaasumaisen polttoaineen sekä hapen konsentraatiota. Polymeerin pinnalle voi muodostua myös fyysinen paloa eristävä kerros. Tämä kerros voi olla polymeeristä riippuen joko orgaaninen karstakerros tai epäorgaaninen keraaminen kerros. Molemmat kerrokset eristävät lämpöä ja toimivat barrierina polymeerin sisältä tulevalle polttoaineelle. [54]

## 4.2 Kemiallinen palonesto

Kemiallinen palonesto perustuu kemialliseen reaktioon joko polymeerin kiinteässä tilassa tai polymeerin pinnalla olevassa kaasufaasissa. Nämä palonestoaineet voidaan lisätä osaksi polymeeriseosta joko seostamalla tai polymeroimalla. [54]

Kiinteässä faasissa tapahtuvat reaktiot pyrkivät joko katkaisemaan polymeeriketjua, jotta polymeeri valuisi ja siirtyisi siten pois paloalueelta, jolloin tavoiteltu lopputulos muistuttaa kynttilää ilman sydäntä, tai muodostamaan polymeerin pinnalle kiinteä paloa eristävä ja hidastava kerros [53, s. 8]. Kiinteä kerros syntyy, kun kemiallisen reaktion seurauksena polymeeriketjusta katkaistaan sivuhaarat. Tällöin pääketjuun jää kaksoissidoksia ja lopulta polymeerin pinnalle muodostuu hiiltynyt kerros. Hiiltynyt kerros voi myös paisua palonestoaineen vaikutuksesta. [54]

Polymeerin pinnalla olevassa kaasufaasissa tapahtuvan kemiallisen reaktion tarkoituksena on pysäyttää palamisessa syntyvät kaasufaasin vapaat radikaalit. Tällöin kaasufaasin radikaalikonsentraatio laskee alle tietyn raja-arvon, jonka ansiosta liekki sammuu ja palanut materiaali alkaa jäähtyä. Vapaiden radikaalien kanssa reagoidessaan kemialliset palonestoaineet muodostavat vähemmän tai ei lainkaan reagoivia molekyylejä. Ongelmana on kuitenkin palossa vapautuva suuri määrä epäpuhtaasti palaneita yhdisteitä, jotka aiheuttavat hengitysteiden ärsytystä ja voivat olla myrkyllisiä. [54]

## 4.3 Palonestolisäaineet

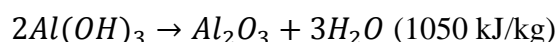
Polymeerien palonestoaineiden tehtävänä on pääsääntöisesti palon pysäyttäminen tai estäminen. Palonestolisäaineet toimivat monilla eri tavoin ja jokaiselle polymeerille tulisi etsiä sen kanssa tehokkaasti toimiva palonestoaine. Eri palonestoaineet vaativat

toimiakseen lisäksi eri seosmäärät. Palonestolisäaineiden konsentraatiot voivat vaihdella hyvinkin paljon ja niiden teho voi vaihdella polymeeristä riippuen. Palonestoaineet voidaan jaotella mm. mineraaleihin, helogenoituihin palonestoaineisiin, fosfori-, typpi- ja piipohjaisiin palonestoaineisiin sekä nano-kokoluokan palonestoaineisiin. [54]

#### 4.3.1 Mineraalit

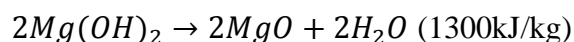
Jokainen epäorgaaninen seosaine vaikuttaa polymeerin palo-ominaisuuksiin. Jopa inertit fillerit parantavat palo-ominaisuuksia, sillä palavien partikkelien konsentraatio pienenee, mikä muuttaa polymeeriseoksen lämmönjohtavuutta ja sen termisiä ominaisuuksia sekä viskositeettia. Kuitenkin eräitä mineraalifillereitä käytetään muita enemmän palonestoaineina. [54]

Metallihydroksidit, erityisesti alumiinitrihydroksidi  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ja magnesiumhydroksidi  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , ovat suosittuja fysikaalisia palonestoaineita. Alumiinihydroksidia pidetään fenolien ohella parhaana halogeenivapaana palonestoaineena. Alumiinihydroksidi hajoaa endotermisesti alumiinioksidiksi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sekä vesihöyryksi [54]:



Vesihöyry toimii kaasufaasissa paloa hidastavana tekijänä, kun taas alumiinioksidi toimii inerttinä lämmöneristeenä. Hajoamisreaktio tapahtuu kuitenkin jo lämpötila-alueella 180-200 °C, rajoittaen polymeerin prosessointilämpötilaa ja täten rajoittaen käytettävien polymeerien määrää matalalla sulaviin polymeereihin, kuten LDPE ja EVA. Alumiinihydroksidin käyttö palonestoaineena on järkevää vain suurilla lisäainepitoisuuksilla. Pitoisuudet voivat olla jopa 75 paino-%. [54]

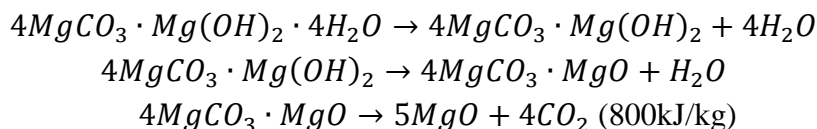
Magnesiumhydroksidi toimii pitkälti samalla tavalla kuin alumiinihydroksidi, mutta magnesiumhydroksidi hajoaa vasta yli 300 °C lämpötiloissa. Magnesiumhydroksidin hajoamisreaktio on:



Magnesiumhydroksidin ja alumiinihydroksidin partikkelikoko vaikuttaa reaktion endotermisyyteen. Pienemmät partikkelit ovat endotermisempia ja muodostavat tiiviimmän hiiltyneen kerroksen polymeerin pinnalle. [54]

Boraatit ovat yksi epäorgaanisten palonestoaineiden ryhmä. Erityisesti sinkkiboraatti on paljon käytetty. Tämä fysikaalinen palonestoaine hajoaa välillä 290 – 450 °C endotermisesti muodostaen samalla vesihöyryä, boorihappoa  $\text{H}_3\text{BO}_3$  sekä boorioksidia  $\text{B}_2\text{O}_3$  (503 kJ/kg). Boorioksidi pehmenee 350 °C:ssa ja sulaa 500 °C:ssa. Tämä muodostaa polymeerin pintaan lasimaisen palolta suojaavan pinnan. Polymeeriketjussa mahdollisesti olevat happiatomit reagoivat boorihapon kanssa muodostaen karstakerroksen. [54]

Hydroksikarbonaatit ovat harvemmin käytettyjä fysikaalisia palonestoaineita. Kaikki hydroksikarbonaatit vapauttavat korkeissa lämpötiloissa hiilidioksidia, mutta vain muutamat laadut vapauttavat sitä polymeerien kannalta riittävän matalissa lämpötiloissa. Magnesiumkarbonaatti vapauttaa hiilidioksidia matalimmassa lämpötilassa 550 °C. Hydroksikarbonaatit vapauttavat myös vettä osana hajoamisreaktiotaan [54]:



Magnesiumkarbonaatti hajoaa laajemmalla lämpötilaskaalalla kuin alumiinihydroksidi tai magnesiumhydroksidi ja sitä voidaan pitää jopa niitä parempana palonestoaineena. [54]

### 4.3.2 Halogenoidut palonestoaineet

Polymeerien palonestossa halogenoituja palonestoaineita on käytetty jo kauan. Polymeeriketjussa sijaitseva halogeeniatomi nostaa LOI-arvoa kaikkein jyrkimmin [56, s. 5-5], sillä halogeeniyhdisteet pyrkivät palotilanteessa hapen läsnä ollessa muodostamaan karstaa [55, s. 10]. Tämä yhdistettynä alhaiseen hintaan tekee näistä materiaaleista suosittuja palonestolisäaineita.

Halogenoitujen palonestoaineiden teho riippuu käytetystä halogeenista. Fluori- ja jodipohjaisia halogenoituja palonestoaineita ei yleisesti käytetä. Fluoripohjaiset palonestoaineet ovat kemiallisesti liian stabiileja, joten niiden kemiallinen hajoaminen tapahtuu polymeerisovelluksien näkökulmasta liian korkeissa lämpötiloissa. Jodipohjaiset palonestoaineet sen sijaan hajoavat liian matalissa lämpötiloissa, hankaloittaen siis polymeerien prosessointia. [54]

Bromi- ja klooripohjaiset palonestoaineet ovat kaikkein käytetyimpiä. Näiden yhdisteiden hajoaminen tapahtuu polymeerin palamisen kannalta oikealla lämpötilasteikolla bromi- ja klooriatomien sekä hiiliatomien välisen alhaisen sidosenergian vuoksi. Polymeeriketjun hajoaminen tuottaa voimakkaasti reagoivia vapaita radikaaleja, kuten  $H^\bullet$  ja  $OH^\bullet$ , jotka pitävät ylläpitävät palamisreaktiota kaasufaasissa. Halogenoiduista palonestolisäaineista termisen hajoamisen seurauksena irronneet bromi- tai klooriatomit reagoivat näiden vapaiden radikaalien kanssa, estäen niiden toiminnan ja siten hilliten paloa. Reaktiotuotteena syntyy myös palamattomia yhdisteitä, jotka voivat toimia myös fyysisinä palonestoaineina laimentaan polymeerin pinnalla olevaa kaasuuntunutta polttoainekerrosta tai muodostamalla paloa hillitsevän inertin kaasukerroksen. [54]

Käytetyin halogenoitu palonestoaine on tetrabromobisfenoli (TBBPA). Erityisen paljon tätä käytetään epoksihartseissa painetuissa piirilevyissä, missä palonestoaineet ovat syntetisoitu osaksi polymeeriketjua. Polybromodifenyylietteri (PBDE) on myös

suosittu palonestoaine. Näitä on kolmea eri tyyppiä: penta-, okta-, ja dekabromodifenyylietteri. Penta- ja oktabromodifenyylietterit koostuvat useiden difenyyliettereiden seoksesta, joissa on sekalainen määrä bromiatomeja. Yhdisteen nimi viittaa keskimääräiseen bromiatomien lukumäärään. Penta- ja oktabromodifenyylietterit ovat tunnistettu dioksiinin esiasteeksi. [54]

Halogenoidut palonestolisäaineet sisällytetään useimmiten polymeeriketjun osaksi. Polymeeriketjun osana näiden palonestolisäaineina on paloneston lisäksi muitakin tehtäviä: ne lisäävät polymeeriketjun ja muiden palonestoaineiden välistä yhteensopivuutta, parantavat materiaalin mekaanista suorituskkyä ja vähentävät palonestoaineiden kulkeutumista polymeerin pinnalle. Näiden lisäaineiden suurin etu on se, että niitä tarvitaan määrällisesti vain vähän. Suurin heikkous sen sijaan on polymeroitumisprosessin vaatima ylimääräinen vaihe, mikä lisää tämän materiaalin valmistuskustannuksia. [54]

Halogenoidut palonestoaineet on kuitenkin todettu aiheuttavan ympäristö- ja terveyshaittoja. Halogenoidut palonestoaineet ovat eläinkokeiden perusteella aiheuttaneet lisääntymiskykyyn liittyviä ongelmia [69, 70], genotoksisuutta, immunotoksisuutta [71, 72] ja neurotoksisuutta [73, 74]. Halogenoidut palonestoaineet ovat toimineet myös karsinogeenina [75]. Ihmisillä halogenoidut palonestoaineet ovat liitetty alentuneeseen älykkyysosamäärään [76], hedelmällisyyteen [77], synnynnäisiin sairauksiin ja hormonaalisiin muutoksiin [78, 79]. Terveysriskiensä vuoksi tietyille halogenoiduille palonestoaineille on asetettu EU:ssa ja Yhdysvalloissa käyttörajoituksia [80; 81; 82, s. 317].

### 4.3.3 Fosfori-pohjaiset palonestoaineet

Fosforipohjaisia palonestoaineita on monenlaisia, kuten fosfaatteja, fosfonaatteja, fosfinaatteja, fosfiinioksideja sekä punaista fosforia. Näitä voidaan käyttää lisäaineina tai ne voidaan asettaa osaksi polymeeriketjua sen syntetisoinnin yhteydessä. Fosforipohjaiset palonestoaineet toimivat sekä kiinteässä että kaasufaasissa. Kiinteässä faasissa fosforipohjaiset palonestoaineet toimivat huomattavasti tehokkaammin happi- tai typpi-atomeja sisältävissä polymeeriketjuissa, jolloin polymeerin pintaan muodostuu karstaa herkemmin. Kaasufaasissa fosfori muodostaa aktiivisia radikaaleja  $\text{PO}_2^\bullet$ ,  $\text{PO}^\bullet$ ,  $\text{HPO}^\bullet$ . Kaasufaasissa fosforipohjaiset radikaalit ovat keskimäärin viisi kertaa tehokkaampia kuin bromiradikaalit ja 10 kertaa tehokkaampia kuin klooriradikaalit. [54]

Punainen fosfori on konsentroiduin fosforin lähde palonestoon. Tätä käytetään pieninä alle 10 paino-% määrinä, jolloin saavutetaan jo merkittävästi parempia palominaisuuksia. Punainen fosfori soveltuu erityisesti polyestereiden, polyamidien ja polyuretaanien palonestoaineeksi. Punaisen fosforin palonesto-ominaisuudet johtuvat happi- tai typpi-atomeja sisältävien polymeeriketjujen tapauksessa punaisen fosforin hapetusreaktiosta, missä syntyy lopulta polyfosforihappoa, mikä edesauttaa karstan muodostumista. Punaisen fosforin ongelma on siitä sulamisvaiheessa ilman kosteuden kanssa reagoidessaan vapautuva erittäin myrkyllinen fosfiinikaasu ( $\text{PH}_3$ ). [54]

Fosfori-pohjaisiin palonestoaineisiin lukeutuvat paisuvat palonestojärjestelmät perustuvat suojattavan kappaleen pinnalle palon aikana muodostuvaan paisuvaan hiiltyneeseen kerrokseen. Tämä kerros toimii lämpöeristeenä ja se estää myös palavien yhdisteiden kulkeutumista polymeerin pinnalle. Paisuvat järjestelmät vaativat pääsääntöisesti kolme eri komponenttia: happolähteen, hiilletysaineen sekä vaahdotusaineen. Happolähde voi olla epäorgaaninen happo, hapon suola tai muu happo, joka edesauttaa hiiltymisaikeen dehydratoitumista. Ammoniumpolyfosfaatti on yleisesti käytetty happolähde. Hiilletysaine on jokin hiilihydraatti, joka dehydratoituu hapon vaikutuksesta ja muodostaa hiiltyneen kerroksen. Vaahdotusaine on termisesti hajoava ja kaasua muodostava komponentti. Tämä reaktio johtaa polymeerin pinnan paisumiseen ja monikerrosrakenteen syntyyn. Vaahdotusaineen terminen hajoaminen tulee tapahtua samaan aikaan kuin hiilletysaine hajoaa termisesti. [54]

#### 4.3.4 Tyypipohjaiset palonestoaineet

Tyypipohjaisista palonestoaineista tärkein on melamiini. Melamiini on fysikaalinen palonestoaine, joka sulaa 345 °C lämpötilassa ja sublimoituu lämpötilassa 350 °C. Sublimoituminen vie suuren määrän energiaa, mikä alentaa paloreaktion lämpötilaa. Korkeissa lämpötiloissa melamiini hajoaa ja muodostaa ammoniakkia. Ammoniakki laimentaa polymeerin pinnan palavien tuotteiden sekä hapen konsentraatiota. Ammoniakki hajoaa lopulta inerteiksi yhdisteiksi. [54]

#### 4.3.5 Piipohjaiset palonestoaineet

Piipohjaisen polymeerin lisääminen polymeeriseokseen joko lisäaineena (fillerinä), kopolymeroimalla hiilipohjaiseen pääketjuun tai käyttämällä piipohjaista polymeeriä rakenteen pääasiallisena matriisimateriaalina parantaa huomattavasti materiaalin palonkestoa. [54]

Silikonien korkea lämmönkesto ja terminen stabiilisuus yhdistettynä niiden taipumukseen muodostaa vain pieniä määriä myrkyllisiä kaasuja palaessaan tekee niistä mielenkiintoisen palonestoaineen. Silikoneja voidaan käyttää palonestoaineina joko seostamalla niitä polymeeriseokseen tai syntetisoimalla ne osaksi polymeerin pääketjua. Silikonit pyrkivät muodostamaan polymeerin pinnalle lämpöä eristävän hiiltyneen kerroksen. [54]

Piidioksidi toimii polymeeriseoksessa fillerinä. Piidioksidin käyttö parantaa palominaisuuksia, kun palavien tuotteiden konsentraatio polymeerin pinnalla pienenee. Käytetyn piidioksidin huokostilavuus vaikuttaa palonesto-ominaisuuksiin, nimittäin suuremman huokostilavuuden omaavat partikkelit eristävät lämpöä pienen huokostilavuuden partikkeleita enemmän. Myös partikkelien koko vaikuttaa palominaisuuksiin. Pienen partikkelikoon piidioksidipartikkelit alensivat kartiokalorimetrimittauksessa lämmön vapautumisnopeutta sekä massan alenemisnopeutta. Tämä palosuojaus tapahtuu kiinteässä faasissa, missä piidioksidipartikkelit siirtyvät materiaalin pintaan ja muodostavat lämpöä eristävän

kerroksen ja vähensivät palolle altistuneen polymeerin määrää kappaleen pinnassa. Suuremman partikkelikoon piidioksidipartikkelit eivät kasaudu palavan polymeerin pinnalle, vaan vajoavat polymeerin sisälle. Tällöin pintaan ei muodostu lämpöä eristävää kerrosta ja piidioksidipartikkelien palonesto-ominaisuudet menetetään. Kriittiseen partikkelikokoon vaikuttaa käytetyn polymeerin viskositeetti. [54]

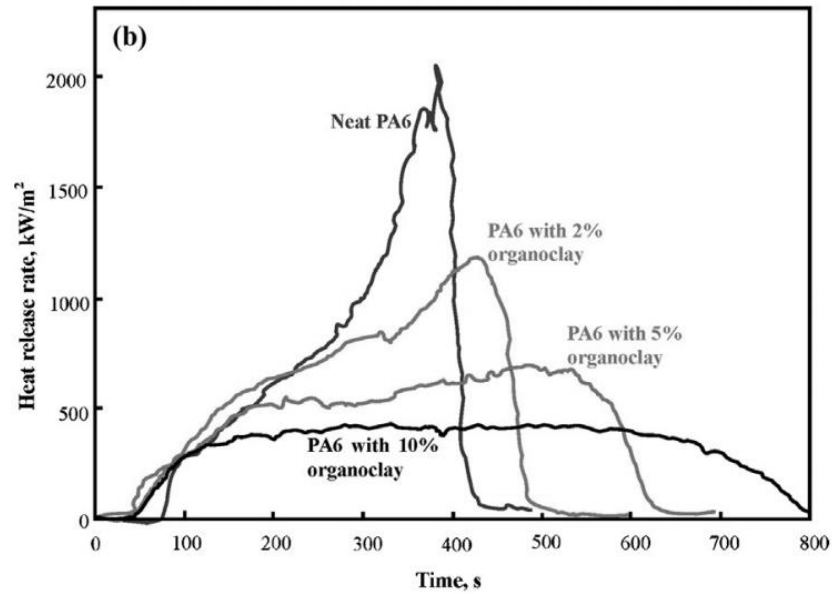
#### 4.3.6 Nano-kokoluokan palonestoaineet

Palonestoaineista puhuttaessa nano-kokoluokan aineiksi luokitellaan partikkelit, joiden partikkelikoko on alle 100 nanometriä. Tällöin partikkelikoko on 10-100 kertaa pienempi kuin perinteisten palonestoaineiden. Nano-palonestoaineet toimivat fillereinä, eivätkä ne liukene polymeeriin. [82, s. 330]

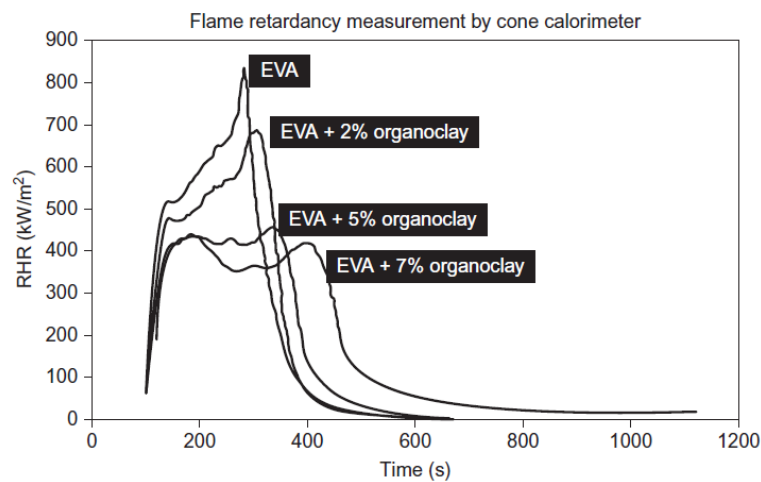
Nano-fillereitä käytetään yleisesti melko pieninä konsentraatioina, vain 2-6 % tuotteen kokonaispainosta. Palotilanteessa nano-fillerit alentavat polymeeristä vapautuvaa lämpöä sekä alentavat polymeerin taipumusta tiputtaa palavia tippoja, mikä voi edistää palon etenemistä. Kuitenkin nano-fillerit eivät itsessään riitä takaamaan polymeerille riittäviä palonesto-ominaisuuksia, ja tämän vuoksi niitä käytetään usein muiden palonestoaineiden yhteydessä. [82, s. 331] Nano-fillereiden ongelmana on palon aikana vapautunut lämpö sekä UL 94V –palokokeessa liian nopea syttyminen [83].

Nano-kokoluokan lisäaineiden dispersio vaikuttaa palo-ominaisuuksiin. Lisäaineen dispersio on erittäin tärkeää myös korotetuissa lämpötiloissa, jolloin polymeeri voi olla osittain tai kokonaan sulanut. Polymeeri-lisäaine –yhdistelmästä riippuen lisäaine voi joko dispergoitua enemmän tai polymeerin ja lisäaineen välisen kompatibilisaattorin termisen hajoamisen vuoksi vähentää dispersioastetta. Dispersiota voidaan tutkia muun muassa mittaamalla reometristen ominaisuuksien muutosta lämpötilan funktiona. [53, s. 11]

Nanosavet ovat ensimmäisiä palonestoaineina tutkittuja nano-kokoluokan lisäaineista. Niiden litteä muoto ajateltiin tuovan erityisesti palo-ominaisuuksiin parannuksia. Polymeerin palaessa sen viskositeetti alenee, mahdollistaen nanosavien kulkeutumisen kappaleen pinnalle. Nanosavet muodostavat jo pienillä pitoisuuksilla pintaan litteän lämpöä eristävän ja palavien yhdisteiden kulkeutumista estävän kerroksen. Tämä kerros toimii samalla tavalla kuin yleisemmin tavatut hiiltynyt kerrokset. Polymeerin pinnalle voi muodostua savikerroksen lisäksi hiiltynyt kerros. [54] Kuvissa 4.2 ja 4.3 on kuvattu PA6- ja EVA-polymeerien palokäytöstä eri nanosaven seosmäärillä.



**Kuva 4.2.** Palon aikana vapautunut lämpö PA6-polymeeristä kartiokolorimetrissä eri nanosaven pitoisuuksilla. [83]



**Kuva 4.3.** Palon aikana vapautunut lämpö (RHR) EVA-polymerin eri nanomontmorilloniittisaven pitoisuuksilla. [82, s. 332]

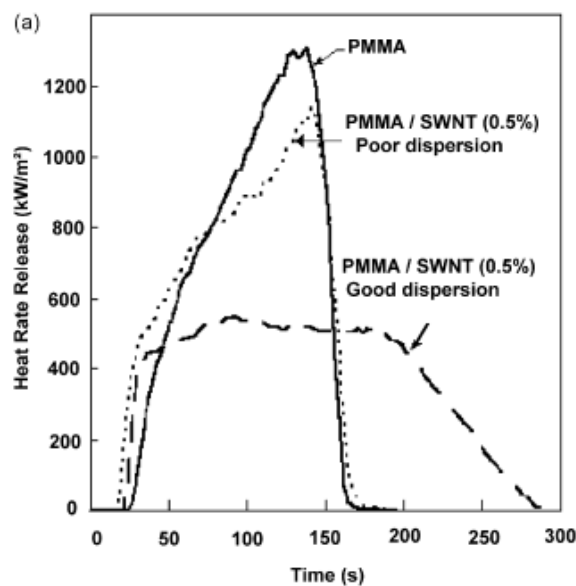
Kuvista 4.2 ja 4.3 voidaan nähdä, että nanosavien käyttö palonestoaineena laskee merkittävästi palamisreaktiossa vapautuvaa lämpöä (RHR). Tämä on seurausta siitä, että nanopartikkelit muodostavat palavan polymerin pinnalle inertin kerroksen, kun polymeeri palaa pois partikkeleiden ympäriltä. Tämä voi hidastaa palon etenemistä jossain määrin, mutta nanosavien käyttö ei tee polymeristä itsestään sammuvaa [83]. Nanolisäaineiden lisäämisellä ei myöskään saavuteta syttyvyyteen parannusta. Nanopartikkeleilla seostettu polymeeri syttyy siis identtisissä oloissa käytännössä samanaikaisesti seostamattoman polymerin kanssa. [83]

Hiilinanoputket ovat tutkituin kuitumainen polymerien palonestolisäaine. Hiilinanoputket kykenevät suuren aspektisuhteensa vuoksi muodostamaan verkoston polymerin sisälle jo pienillä lisäainepitoisuuksilla. Tämä parantaa polymerin



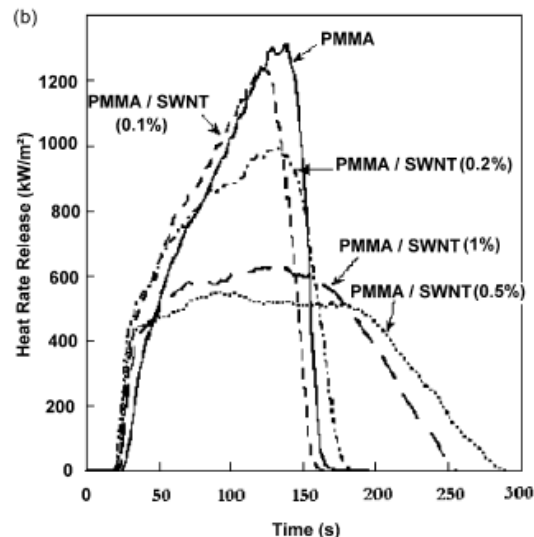
mekaanisia, reologisia ja palonesto-ominaisuuksia. Hiilinanoputkilla voidaan korvata nanosavien käyttö. Hiilinanoputkien terveysvaikutuksia ei edelleenkään täysin tunneta. [82, s. 332].

Hiilinanoputkia käytettäessä palonestossa on aina huomioitava hiilinanoputkien riittävä dispersio polymeerin sisällä. Mikäli dispersio on heikkoa, käyttäytyy seostettu polymeeri palotilanteessa kuin seostamaton polymeeri kuvan 4.4 mukaisesti. Heikko dispersio vaikuttaa polymeerin pintaan muodostuvaan hiiltyneeseen kerrokseen, mikä suoraan vaikuttaa palo-ominaisuuksiin. Hyvän dispersion polymeeriseos muodostaa tasaisen hiiltyneen kerroksen, kun taas heikon dispersion polymeeriseos muodostaa karkean ja laikukkaan hiiltyneen kerroksen. [54]



**Kuva 4.4.** Hiilinanoputkien dispersion vaikutus palokäyttäytymiseen. [54]

Dispersion lisäksi hiilinanoputkien palokäyttäytymiseen vaikuttaa niiden konsentraatio polymeeriseoksessa. Hiilinanoputkien konsentraatio voi olla jopa pienempi kuin nanosavilla. Kuvassa 4.5 on esitetty PMMA-polymeerin palokäytöksen riippuvuus hiilinanoputkien konsentraatiosta. Mikäli konsentraatio on riittämätön, ei palokäytöksessä tapahdu juuri muutoksia, mutta tietyn kriittisen konsentraation jälkeen ei palo-ominaisuudet enää juuri parane. Hiilinanoputket eivät juuri vaikuta polymeerien syttyvyyteen. Tässä suhteessa hiilinanoputkien lisääminen vaikuttaa palo-ominaisuuksiin nanosavien tapaisesti. [54]



*Kuva 4.5. Hiilinanoputkien konsentraation vaikutus palokäyttäytymiseen. [54]*

#### 4.4 Palonestoaineiden synergiaetuja

Palonestoaineiden synergiaeduilla tarkoitetaan tilannetta, missä käytetään kahta tai useampaa eri palonestoaainetta antamaan paremmat palonesto-ominaisuudet kuin mitä vain yhdellä palonestoaineella olisi saavutettavissa samalla seosainepitoisuudella. Tällaiseen tilanteeseen voidaan päästä hyödyntämällä eri palonestomekanismeja, kuten kaasufaasin radikaalien hallinta samalla, kun kiinteässä faasissa muodostuu paloa estävä hiiltynyt kerros. [54]

Synergiaetuja voidaan saavuttaa myös keskittymällä vain yhteen palonestomekanismiin, kuten kiinteän faasin palonestoon. Nanosavien käyttö yhdessä fosforipohjaisen palonestoaineen kanssa on eräs esimerkki tällaisesta. [54]

Synergiaedut voivat olla muitakin kuin vain palamiseen liittyvien ominaisuuksien parantamista. Palonestoaineiden käyttö lisäaineina yleensä vaikuttaa negatiivisesti joihinkin polymeerin toisiin ominaisuuksiin. Tämän vuoksi polymeerien palonestolisäaineina voidaan jatkossa käyttää perinteisten palonestolisäaineiden ja nanokokoluokan lisäaineiden seosta [53], sillä perinteisten palonestolisäaineiden aiheuttama mekaanisten ominaisuuksien lasku voidaan kompensoida nano-lisäaineilla. Tämän lisäksi molemmat lisäaineet parantavat palonesto-ominaisuuksia.

Seosaineiden pitoisuuksia voidaan myös pienentää käyttämällä palonestoaineiden yhdistelmää. S. Höroldin mukaan [84] erityisesti komposiiteissa, missä lujitekuidun osuus on suuri, voidaan matriisimateriaalin mekaaniset ominaisuudet pitää riittävinä laskemalla palonestolisäainepitoisuutta. Esimerkkinä hän käyttää alumiinihydroksidin yhdistämistä ammonium polyfosfaattiin ja punaiseen fosforiin.

## 5 KOKEELLINEN OSUUS

Työn kokeellisessa osuudessa pyrittiin hyödyntämään teoriaosuudessa esiteltyjä lainalaisuuksia lopputuotteen rakenteen ja materiaalien valinnoissa. Kokeellisessa osuudessa tarkasteltiin kahdeksaa eri rakennetta. Tässä työssä ei käsitellä palotiivisteitä, palo-ovien ikkunoita, saranoita tai muita palo-oven rakenteita pinta- ja ydinaihioiden lisäksi.

Kokeellisen osuuden suunnittelu aloitettiin kartoittamalla eri ydinaihioiden materiaalivaihtoehtoja ja niiden yhdistelmien mahdollisuuksia. Tämän lisäksi oven pintaan jäävän polymeerikerroksen materiaalivaihtoehtoja tarkasteltiin kriittisesti valmistettavuuden, kustannusten, tuotteen pinnanlaadun sekä palo-ominaisuuksien suhteen.

Kokeellinen osuus jaettiin kahteen osaan, missä ensimmäisessä pyrittiin suorittamaan materiaalivaihtoehtojen alkukarsinta nopeilla ja yksinkertaisilla laboratoriomittauksilla. Ensimmäisen osan tarkoituksena oli verrata uusia materiaalikombinaatioita jo käytössä oleviin rakenteisiin. Jälkimmäisessä osassa valmistettiin täysmittaisia tuotteita, joita testattiin suuremmassa mittakaavassa. Jälkimmäisen osuuden painopiste on palonkeston, ääneneristyskyvyn, hyvän pinnanlaadun ja valmistettavuuden varmistamisessa.

### 5.1 Pintamateriaalit

Pintamateriaalin valinnassa painotettiin ovien valmistettavuutta. Valmistusteknisestä näkökulmasta kertamuovit ovat kestopuoveja parempi vaihtoehto niiden alhaisen hinnan, helpon työstettävyyden ja riittävän pitkän käsittelyajan vuoksi. Tämä helpottaa muun muassa kuitulujitteiden käyttöä ja suurten kappaleiden valmistamista. Tämän vuoksi tässä työssä keskitytään vain kuitulujitettuihin kertamuoveihin.

Polymeeristen ovien pintamateriaalina usein käytetty polyesterihartsipalaa helposti ilman palonestolisäaineita. Näiden lisäaineiden tuoma hyöty on polttokammiossa tapahtuvan polttokokeen kannalta todennäköisesti pieni, ellei materiaalin pintaan saada aikaiseksi paikoillaan pysyvää, korkeita lämpötiloja kestäväää ja samalla lämmön johtumista eristävää kerrosta. Tämän vuoksi lisäaineistuksessa on keskityttävä kiinteään orgaanisen karstakerroksen tai epäorgaanisen keraamisen kerroksen muodostajiin.

Palonestolisäaineista mineraalit vaativat pääsääntöisesti liian suuret seosainepitoisuudet lujitekuitujen kanssa toimimiseksi. Lisäksi niiden palonesto perustuu inertin kaasun vapauttamiseen, mikä ei polttokokeessa luultavasti riittävästi estä polymeerin palamista. Myrkyllisiä kaasuja tai happoja vapauttavat palonestoaineet

kuten boraatit ja fosforipohjaiset palonestoaineet ovat tulipalosta poistujien ja pelastushenkilökunnan näkökulmasta huono valinta.

Karstanmuodostajista tunnetuin palonestoryhmä, halogeenipohjaiset palonestoaineet, ovat viime aikoina joutuneet terveysuhkaepäilyjen ja lainsäädännön tiukentumisen kohteeksi, jonka vuoksi ei halogeenipohjaisia palonestoaineita ole tässä työssä mielekästä käsitellä enempää. Nanopartikkeleiden tuomat sulamista estävät ja mekaanisia ominaisuuksia nostavat ominaisuudet ovat kertamuovipalo-ovien kohdalla epäolennaisia. Kertamuovit eivät valu palaessaan eikä palo-ovirakenteessa tapahdu merkittäviä mekaanisten ominaisuuksien paranemista, sillä käytettyä polymeeriä seostetaan jo lujitekuidulla. Palo-ominaisuuksien heikon paranemisen vuoksi nanopartikkeleita ei tässä työssä käsitellä tarkemmin. Myös muut täyteaineet, eli fillerit, vaativat suuret seosainepitoisuudet ja siten vaikuttavat hartsin viskositeettiarvoihin liikaa, minkä vuoksi ne ovat rajattu pois.

Vaihtoehdoksi jää polyesterihartsin vaihto inherentisti palamattomaan vaihtoehtoon, kuten fenoliin. Fenoli polymeroituu kondensaatiopolymeraatiolla, mikä vapauttaa polymeraation yhteydessä vesimolekyylejä. Tämä polymeroitumisreaktio eroaa oleellisesti esimerkiksi polyesterihartsin additiopolymeraatioreaktiosta, mikä ei vapauta mitään molekyylejä polymeroitumisen aikana. Tämän lisäksi fenolin polymeroitumisreaktio vaatii joko emäksisen tai happaman initiaattorin polymeroitumisreaktion aloittamiseksi sekä korotetun lämpötilan polymeroitumisreaktion loppuun saattamiseksi. Riskinä oli ovien valmistuslaitteiden korrodoituminen. Markkinoilla oli lisäksi tarjolla vain puuteollisuuden käyttöön räätälöityjä liimaamiseen tarkoitettuja fenolilaatuja, joiden korkeat viskositeetit ja lyhyet käsittelyajat eivät mahdollista lujitekuituovien valmistamista. Näiden syiden vuoksi jouduimme jättämään fenolilaadut pois laskuista.

Palonestolisäaineiden ja matriisimateriaalien karsintaa rajasi suorituskyky- ja ympäristösyiden lisäksi myös tuotteiden saatavuus. Valtaosa palonkestävistä hartseista toimitetaan asiakkaille valmiiksi seostettuina, jolloin hartsin valmistaja voi taata tuotteen palonkesto-ominaisuudet. Näiden hartsienviskositeetit sekä geeliytymis- ja käsittelyajat eroavat toisistaan paljonkin, joten usein hartsit räätälöidään käyttökohteen vaatimusten mukaan. Myös valmiiksi seostetun tuotteen reseptiä ei aina kerrota. Tavarantoimittajalta olisi pitänyt siis löytää tähän tuotantoprosessiin räätälöity palonestolisäaineistettu hartsi, mitä ei onnistuttu tämän työn yhteydessä hankkimaan. Lopuksi päädyimme käyttämään polyesterihartsia tuotteiden pinnassa.

Polymeerin kuitulujitteen vaihtaminen olisi ollut myös mahdollista. Esimerkiksi biohajoavien kuitulujitteiden tarjoama lämmön- ja ääneneristyskyky olisi lasikuitua parempi [56, s. 5-146]. Nämä kuidut kuitenkin palavat pois polttokammiossa, eivätkä ne jää lasikuidun tapaan antamaan oven pintaan ohutta, mutta tärkeätä lämmöneristyskerrosta. Lasikuitu tarjoaa lisäksi parhaan hinta/laatu –suhteen, minkä vuoksi päädyimme lasikuidun käyttöön oven pintamateriaalissa.

## 5.2 Oven sisäinen rakenne

Tämän työn tärkeimpänä tavoitteena oli parantaa palonesto-ominaisuuksia ilman, että oven muut ominaisuudet kärsivät. Ovelta vaaditut ominaisuudet laitettiin tärkeysjärjestykseen kuvan 5.1 CR-matriisin avulla. CR-matriisin avulla voidaan vertailla eri vaatimuksia toisiinsa nähden, jolloin osataan keskittyä tärkeimpien ominaisuuksien parantamiseen.

	Maksimikäyttölämpötila	Lämmöneristys	Tiheys	Ääneneristyskyky	Pinnanlaatu	Materiaalikustannukset	Valmistuskustannukset	Puristuslujuus	Taivutuslujuus	Iskulujuus	Priority	Normalised Priority
Maksimikäyttölämpötila		2	1	2	1	1	1	2	1	2	13	1,44
Lämmöneristys			2	2	1	2	2	2	2	2	15	1,67
Tiheys				1	0	1	1	1	1	2	8	0,89
Ääneneristyskyky					0	2	2	2	1	1	9	1,00
Pinnanlaatu						2	1	2	2	2	15	1,67
Materiaalikustannukset							0	1	1	1	5	0,56
Valmistuskustannukset								2	2	2	11	1,22
Puristuslujuus									0	1	3	0,33
Taivutuslujuus										2	8	0,89
Iskulujuus											3	0,33

*Kuva 5.1. Täytetty CR-matriisi, mistä nähdään eri vaatimusten suhteellinen tärkeys.*

Ydinaihion eri materiaalivaihtoehdot pyrittiin täten asettamaan ensisijaisesti lämmöneristysominaisuuksien mukaan paremmuusjärjestykseen ja vasta tämän jälkeen arvioitiin muita ominaisuuksia. Toisena tärkeänä vaatimuksena oli pinnanlaadun säilyminen edelleen hyvänä. Tuotteen pinnanlaatuun vaikuttaa muun muassa ydinaihion kovuus.

Ydinaihiomateriaaleiksi rajattiin keraamit niiden hyvien termisten ominaisuuksiensa vuoksi, mutta myös niiden alhaisen tiheyden ja yleensä matalan hinnan vuoksi. Keraamien joukosta jouduimme jättämään aerogeelit pois niiden korkean hinnan vuoksi. Tulevaisuudessa kuitenkin aerogeelien käyttö tulee taloudellisesti kannattavaksi, kun aerogeelien massatuotannon yleistymisen alentaa aerogeelin hintaa ja uusia, mekaanisesti kestävämpiä aerogeelilaatuja tulee tarjolle.

Kokeellinen osuus päätettiin aloittaa valitsemalla kahdeksan erilaista materiaalikombinaatiota esitesteihin, missä voidaan verrata uusia materiaalivaihtoehtoja referenssimateriaaleihin, asettamaan eri ominaisuuksille tavoitearvoja sekä karsimaan toimimattomat materiaaliyhdistelmät. Esitesteissä käsitellään vain ydinaihia, joten polymeeripinnoitteen vaikutus jää tässä vaiheessa vielä epäselväksi.

Esitestien ensimmäinen materiaali on referenssimateriaali, johon muita materiaalivaihtoehtoja verrataan. Tämän materiaalin käytöstä on kertynyt käytännön kokemusta jo muutaman vuoden ajalta ja tämän materiaalin palonesto- ja ääneneristyskyky tunnetaan. Tätä materiaalia kutsutaan tässä työssä referenssiksi.

Toinen testattava materiaali on tiheä ja jäykkä, palamaton levy, joka ei ole ollut vielä tuotannossa. Korkean massansa vuoksi tämän levyn tuotantoon ottaminen on ongelmallista. Korkea massa parantaa ääneneristävyyttä massalain nojalla, mutta

toisaalta levyn suuri jäykkyys voi aiheuttaa resonansseja. Myös lämmöneristysominaisuudet sekä mekaaniset ominaisuudet ovat suuren mielenkiinnon aihe. Tämä levy koottiin liimaamalla kolmesta ohuemmasta levystä. Tätä materiaalia kutsutaan jatkossa rakenne A:ksi.

Kolmas testattava materiaali on hyvällä lämmöneristysominaisuuksilla varustettu, mutta silti matalatiheysinen levy. Matalan tiheydensä vuoksi tämän levyn ääneneristysominaisuudet ovat liian huonot, eikä tätä levyä voida käyttää tuotannossa sellaisenaan. Tältä levyltä odotetaan kuitenkin selkeästi referenssimateriaalia parempaa lämmöneristyskykyä. Hyvä lämmöneristyskyky yhdistettynä alhaiseen massaan mahdollistaa tällaisen levyn käytön muissa oviapplikaatioissa, kuten röntgenovissa, missä oveen asennettu lyijylevy parantaa ennestään heikoksi jääneitä ääneneristysominaisuuksia. Tämän materiaalin matala tiheys pitää röntgenovien painon kurissa lyijylevyistä huolimatta. Tätä materiaalia kutsutaan jatkossa rakenne B:ksi.

Alhaisen massan keraamilevyt eivät eristä ääntä riittävästi. Tästä syystä neljäs materiaalikombinaatio pitää sisällään korkeita lämpötiloja kestävät, lämpöä hyvin eristävät ja matalatiheysiset pintalevyt, joidenka väliin asetetaan ääntä eristävä, tiheydeltään korkeampi levy. Tämä tiheämpi levy toimii osittain myös lämmöneristeenä, mutta sen ensisijainen tehtävä on toimia ääneneristeenä. Tämän materiaalikombinaation pitäisi parantaa lämmöneristyskykyä referenssimateriaaliin nähden, pitäen samalla ääneneristyskyvyn ennallaan ja vaikuttamatta liiaksi tiheyteen. Tätä näytettä kutsutaan jatkossa rakenne C:ksi.

Suuremman tiheyden levyjen ääneneristysominaisuudet ovat hyvät, mutta niiden lämmöneristyskyky on riittämätön ja tiheys liian suuri. Tämän vuoksi lämmöneristysominaisuuksia parantamaan ja samalla oven kokonaismassaa alentamaan valittiin pintalevyjen väliin liimattava matalatiheysinen lämpöä eristävä kerros. Tämä ratkaisu parantaa lämmöneristysominaisuuksia oleellisesti ja alentaa samalla tuotteen neliömassaa. Pintalevyt kantavat mekaanista kuormaa, eristävät lämpöä ja ne toimivat lisäksi ääneneristeenä. Tämänäyttyppejä näytteitä oli kolme erilaista, joista jokaisessa oli erilaiset pintalevymateriaalit: rakenne D, rakenne E ja rakenne F.

Maksimaalista lämmöneristystä lähdettiin hakemaan käyttämällä parhaiten lämpöä eristäviä pintalevyjä ja asentamalla niiden välille lisäksi vielä samanlainen matalatiheysinen lämpöä eristävä kerros, mitä on käytetty myös rakenteissa D, E ja F. Tämä rakenne painaa 65 % vähemmän kuin referenssimateriaali ja sillä on teoriassa yli 100 % parempi lämmöneristyskyky. Tämä rakenne ei sovellu alhaisen massan vuoksi sellaisenaan tuotantoon, sillä sen ääneneristysominaisuudet eivät todennäköisesti ole riittävän hyvät. Tätäkin ydinaihiota voitaisiin käyttää esimerkiksi röntgenovissa, missä lyijylevyt nostavat oven massaa ja parantavat ääneneristyskykyä. Tällä rakenteella saadaan hyvän käsitys siitä, millainen neliömassa/ääneneristyskyky on mahdollista saada aikaiseksi. Tätä näytettä kutsutaan jatkossa rakenne G:ksi.

Taulukossa 5.1 on esitetty laskennallisesti odotettavissa olevat lämmöneristysominaisuudet sekä neliömassat 35 mm paksuille ydinaihioidille. Levyjen neliömassat eivät sisällä varsinaiseksi oveksi valmistamisen vaatiman lasikuitu-hartsin –

pintakerroksen aiheuttamaa lisäpainoa. Ääneneristysominaisuuksia ei tässä vaiheessa laskettu puutteellisten lähtötietojen (Poissonin vakio, Youngin moduuli) vuoksi.

**Taulukko 5.1.** Esitesteihin valittujen materiaalien odotettavissa olevia ominaisuuksia. Termiset ominaisuudet ovat laskettu käyttäen kaavaa (21). Levyn neliömassa on laskettu käyttäen materiaaleista saatuja teknisiä tietoja.

Näytteen nimi	Terminen resistiivisyys $R_t$ [(m <sup>2</sup> K) /W]	Levyn neliömassa [kg/m <sup>2</sup> ]
Referenssi	0,25	16,6
Rakenne A	0,25	36,8
Rakenne B	0,44	8,6
Rakenne C	0,32	23,9
Rakenne D	0,38	21,5
Rakenne E	0,38	24,2
Rakenne F	0,30	36,1
Rakenne G	0,53	7,2

## 5.3 Esikarsintatestit

Esikarsintatesteissä keskityttiin ydinaihion ominaisuuksien mittaamiseen. Eri materiaalikombinaatiot valmisteltiin levyiksi käsin. Levyistä leikattiin irti kuhunkin testiin sopivan kokoiset palaset. Esitesteissä testattiin valmiin oven kannalta viittä ydinaihion tärkeintä ominaisuutta: lämmöneristyskykyä, puristuslujuutta, taivutuslujuutta, pinnan kovuutta sekä äänenabsorptiota.

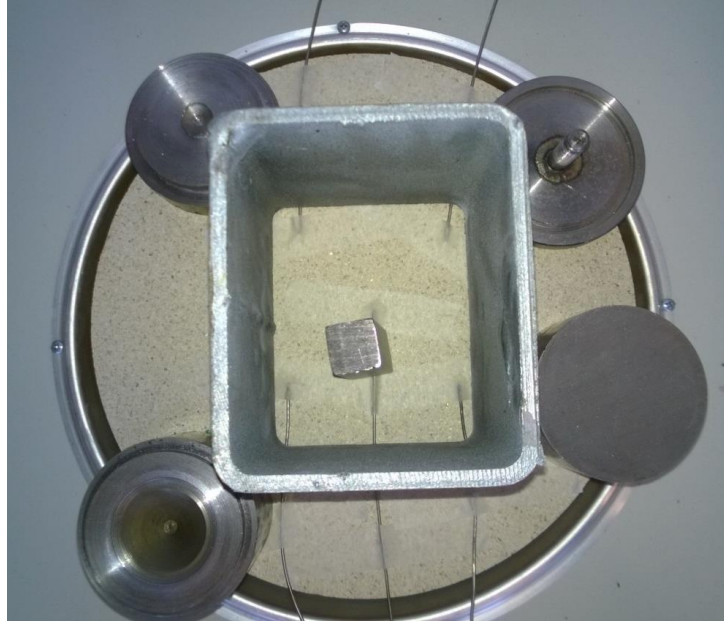
### 5.3.1 Lämmöneristysominaisuudet

Lämmöneristystä testattiin käyttämällä putkiuunia. Putkiuunin sisälle asetettiin alkulämpötila 500 °C, jonka jälkeen näyte asetettiin putkiuunin suuaukon päälle. Näytteen ulkopintaan oli kiinnitetty viisi termoelementtiä, joiden avulla voitiin ulkopinnan lämpenemistä mitata reaaliajassa. Koetta jatkettiin, kunnes pintalämmöt olivat keskimäärin 140 °C ympäröivää huoneenlämpötilaa korkeammat tai yhden termoelementin lämpötila ylitti 180 °C:lla ympäröivän huoneenlämpötilan.

Ydinaihion lämmöneristyskyvyn määrittämiseksi valmistettiin ydinaihiolevyistä muodoltaan pyöreitä näytteitä, jotka tiivistettiin reunoiltaan putkiuunin suulle. Näytteiden ulkomitat sekä paino mitattiin ennen lämmöneristyskoetta. Uuni oli Lindberg/Blue'n valmistama CF56822C ja sitä ohjattiin uuniin kiinnitettävän Lindberg/Blue'n ohjausyksikön 91P PID avulla. Uunin sisällä oleva termoelementti kertoi reaaliajassa uunissa vallitsevan lämpötilan.

Mitattavan kappaleen pintaan kiinnitettiin viisi K-tyypin termoelementtiä, jotka kytkettiin tiedonkeruulaitteiston kautta kannettavaan tietokoneeseen. Tietokoneen avulla

saatiin määritettyä kunkin termoelementin lämpötila reaaliaikaisesti. Termoelementit kiinnitettiin mitattavan kappaleen pintaan ensin pelkän teipin avulla, mutta myöhemmin myös irrotettavan painon avulla, jotta termoelementin pää pysyisi kiinni mitattavassa pinnassa koko mittauksen ajan. Näytteen kiinnitys on havainnollistettu kuvassa 5.2.



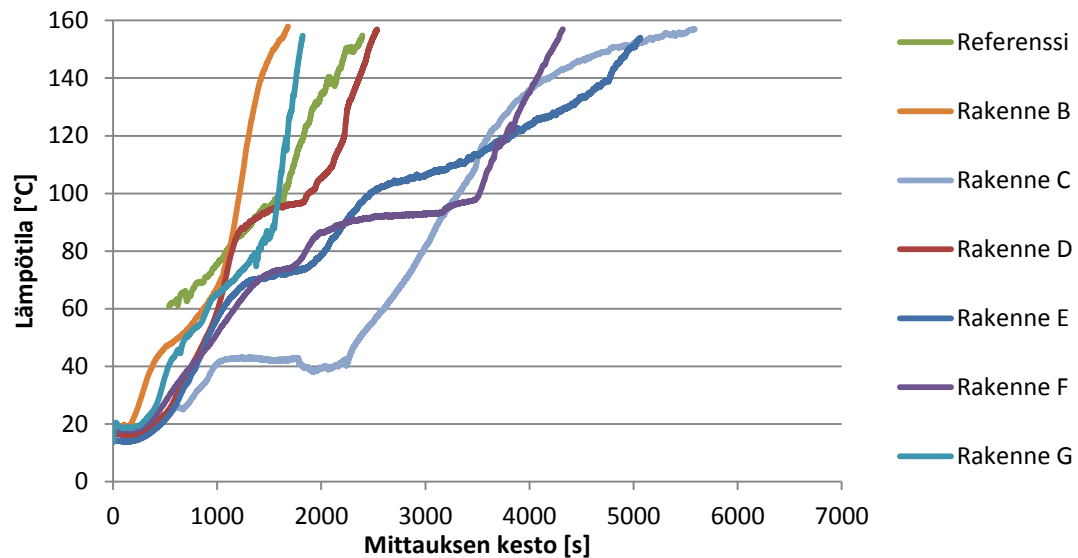
**Kuva 5.2.** Termoelementtien kiinnitys näytteiden pintaan teipin ja painojen avulla lämmöneristyskoetta varten.

Mittaus suoritettiin ennalta määrättyjä parametreja noudattaen. Uuniin asetettiin tasainen 500 °C lämpötila, jonka annettiin tasaantua uunin suu kannella peitettynä. Lämpötilan tasaannuttua uunin suulta poistettiin kansi, jonka jälkeen suulle asetettiin huokoinen keraaminen tiivisterengas. Tiivisterengkaan päälle asetettiin mitattava kappale yhdessä termoelementtien kanssa. Mittaus aloitettiin, kun oli varmistuttu, että näyte istui tiiviisti uunin päällä. Minuutin kuluttua mittauksen alkamisesta asetettiin uuniin uusi tavoitelämpötila, 1000 °C. Uunin ohjausyksikkö kontrolloi lämpötilan nousunopeutta ennalta määrättyjen ohjeiden perusteella. Nousunopeudeksi asetettiin 30 °C minuutissa. Uunin lämpötilan noustua 1000 °C:een lämpötilan nousu loppui ja uuni säilytti tavoitelämpötilan kokeen loppuun saakka. Koe päättyi, kun yhden mitattavan levyn pintaan kiinnitetyn termoelementin lämpötila kohosi 180 °C yli ympäröivän huoneenlämpötilan, tai kun kaikkien viiden termoelementin keskilämpötila kohosi 140 °C yli ympäröivän huoneenlämpötilan. Uunihuoneen lämpötila pysyi kokeen ajan suhteellisen vakiona tehokkaan ilmanvaihdon sekä uunin hyvän lämmöneristyksen ansiosta. Kokeen päätyttyä uunista katkaistiin virta ja sen annettiin jäähtyä. Näyte poistettiin uunin suulta, kun uuni oli jäähtynyt alle 500 °C lämpöiseksi. Tämän jälkeen uunin suulle asetettiin jälleen kansi ja uunin lämpötila asetettiin 500 °C:een. Tämän jälkeen koe voitiin toistaa toisella näytteellä. Näytteiden valmistus rakenne A:sta ei onnistunut, eikä sitä mitattu tässä testissä. Tämä näyte oli koottu liimaamalla kolmesta



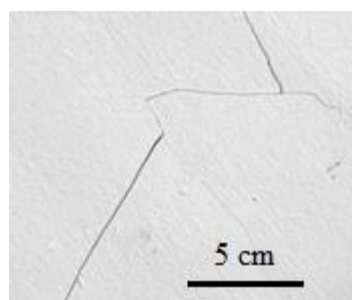
ohuemmasta levystä. Liimauksen aikana levyt olivat käpristyneet hieman, minkä vuoksi nämä levyt eivät pysyneet toisissaan kiinni jäykkyytensä ja kovuutensa vuoksi.

Lämmöneristysmittauksen mittau tulokset ovat esitetty kuvassa 5.3. Koe päättyi aina siihen, että näytteen keskimääräinen lämpötila kohosi 140 °C yli ympäröivän huoneenlämmön. Tämän vuoksi myös kuvan 5.3 kuvaajat esittävät termoelementtien keskimääräistä lämpötilaa. Referenssinäytteen käyrä alkaa poikkeuksellisesti vasta noin 500 sekunnin ja 60 °C kohdalta, koska termoelementtien johdot olivat aluksi asetettu tiedonkeruulaitteeseen väärin päin.



**Kuva 5.3.** Näytteen pintaan kiinnitettyjen termoelementtien keskimääräinen lämpötila. Referenssinäytteen tulokset alkavat poikkeuksellisesti vasta noin 500 sekunnin kohdalta, jolloin termoelementtien alun perin väärä kiinnitys saatiin korjattua.

Erityisesti niissä rakennevaihtoehdoissa, joissa oli pintalevyjen väliin asetettu lämpöä eristävä kerros, esiintyi uunin puoleisen pintalevyn säröilyä. Säröily aiheutti korvin kuultavan äänen, joka jatkui joitain minutteja. Tämän jälkeen näytteen ulkopinnan lämpötila alkoi nopeasti kohota. Pintalevyn säröily on havainnollistettu kuvassa 5.4. Erityisen ongelmallinen pintakerroksen halkeaminen oli rakenteella G, missä pintakerroksen halkeilun lisäksi esiintyi myös rakenteen sisäisen liimauksen pettämistä.



**Kuva 5.4.** Lämmöneristysmittauksessa esiintynyttä pintalevyn säröilyä.

Pintalevyn säröilyä esiintyi myös rakenteissa C, D ja F. Säröilyn vaikutus nähdään pinnan lämpötilan nopeana nousuna. Rakenteessa C petti myös uunin puoleinen pintalevyn liimaus. Heikoimmin testissä menestyneeseen rakenteeseen B ilmestyi myös halkeama, vaikka kyseessä ei ollut monikerrosrakenne.

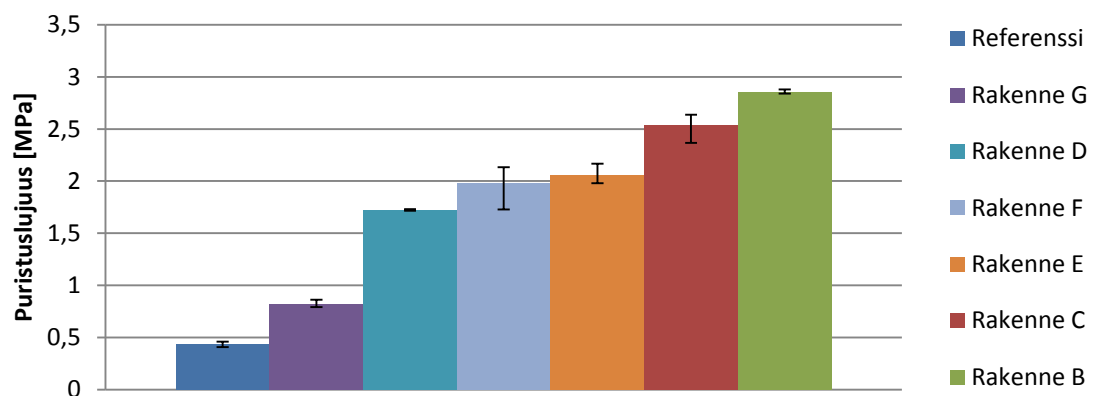
Referenssimateriaali ei halkeillut kokeen aikana, mutta sen rakenne muuttui hauraaksi. Myöskään rakenteen E pintalevy ei säröillyt kokeen aikana, minkä vuoksi pinnan lämpötilan nousu oli kaikkein tasaisinta. Uunin puolella ollut pintalevy muuttui kokeen aikana kuitenkin pehmeäksi ja pölyäväksi.

Pintalevyn säröilyn vaikutus on olennainen tämän testin tuloksen kannalta. Ennen testejä määritellyt lämmöneristyskertoimet antoivat odottaa monelta materiaalilta selkeästi parempaa suorituskkyä, kuin mitä todellisuudessa saavutettiin. Pintalevyjen säröilyyn saattoi vaikuttaa niiden sisäinen rakenne ja heterogeenisyys. Pintalevyn halkeilun estäminen ja pintalevyjen liimauksen pysyvyyden varmistaminen ovat todennäköisesti tulevaisuudessa tärkeimmät prioriteetit uusia rakenteita tarkasteltaessa.

### 5.3.2 Puristuslujuus

Puristuslujuus määriteltiin painamalla ympyrän muotoisia näytteitä Instron 5967 –vetolaitteella. Jokaisesta rakennevaihtoehdosta valmistettiin kolme puristuskoenäytettä. Ennen mittausta näytteiden mitat mitattiin ja painot punnittiin. Tämän jälkeen näyte asetettiin poikkileikkaukseltaan pyöreän painimen alle. Mittauksessa painimen pää liikkui nopeudella 1 mm/min ja voimaa mitattiin 30 kN voimasellillä. Mittausta jatkettiin, kunnes voiman kasvu hidastui, pysähtyi tai kunnes voima pieneni.

Kuvassa 5.5 on esitetty jokaisen materiaalityypin puristuslujuus sekä mittauksista lasketut puristuslujuuden vaihteluvälit. Tuloksista puuttuu jälleen kerran rakenteen A tulokset, koska tämän levyn liimaus petti uusintaliimauksesta huolimatta.



**Kuva 5.5.** Ydinaihiomateriaalien puristuslujuudet sekä mittauksista lasketut puristuslujuuden vaihteluvälit.

Rakenteen G puristuslujuutta rajasi pintalevyjen puristuslujuus. Rakenteissa D, E ja F rajaavaksi tekijäksi osoittautui pintalevyjen väliin asetetun lämpöä eristävän kerroksen puristuslujuus.

Referenssimateriaalin puristuslujuus on näiden mittausten perusteella alle 0,5 MPa. Kuitenkin referenssimateriaalikin selviää oven valmistusprosessista, missä siihen kohdistuu kappaleessa 2.1.1 mainittu korkeampi jännitys. Referenssimateriaali saattoi saada näissä mittauksissa liian pienen puristuslujuuden arvon. Mittauksissa käytettiin pieniä näytteitä, joilla näytteen kehän suhde pinta-alaan on suuri, jolloin näytteen reunaefekti, eli reunan vaikutus mitattuun ominaisuuteen, kasvaa. Lisäksi referenssinäyte on saattanut hieman vaurioitua näytteenvalmistuksessa. Tästä huolimatta näytteiden välillä ei vaihtelua puristuslujuuksissa juuri ollut, joten jokainen näyte on vaurioitunut tasaisesti.

Näiden mittausten perusteella jokainen rakennevaihtoehto ylittää referenssimateriaalin puristuslujuuden. Täten voidaan olettaa, että ne myös selviävät valmistusprosessista puristuksen näkökulmasta.

### 5.3.3 Taivutuslujuus

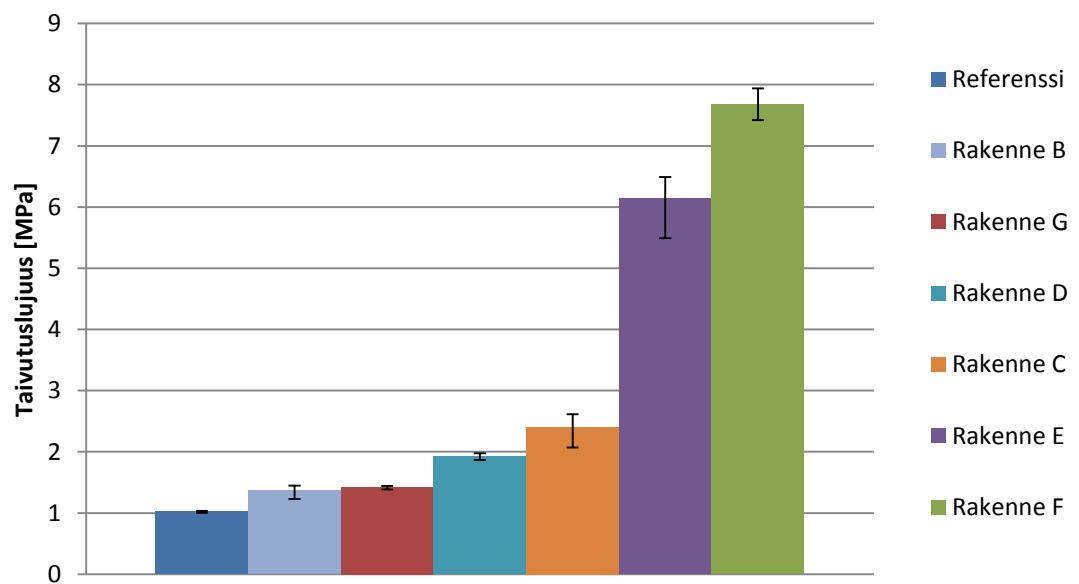
Taivutuslujuutta mitattiin nelipistetaivutuksella. Nelipistetaivutuksen koelaitteistona käytettiin samaa Instron 5967 –vetolaitetta, kuin puristuskoe mittauksissa. Jokaisesta materiaalivehtoehdosta valmistettiin suorakaiteen muotoisia näytteitä ( $35 \times 7 \times 3,5 \text{ cm}^3$ ). Testeissä käytettiin standardin ISO 14704:2008 vaatimia näytteitä lyhyempiä näytteitä käytännön syistä. Testattavaa materiaalia ei ollut riittävästi. Lyhyempien näytteiden käyttö painottaa näin paksujen näytteiden kohdalla rakenteen leikkauslujuutta, eli tässä tapauksessa rakenteen sisäistä voimansiirtokykyä.

Nelipistetaivutuksessa yläpainimessa käytettiin 20 cm jänneväliä. Alapainimen jänneväli oli 30 cm. Yläpainin liikkui alaspäin nopeudella 6 mm/min ja voimaa mitattiin 30 kN voimasellillä. Mittausta jatkettiin, kunnes mitattu voima ei enää noussut.

Kaikista materiaaliyhdistelmistä valmistettiin kolme näytettä, paitsi rakenteista D ja F, joista valmistettiin kaksi näytettä ja rakenteesta C, josta valmistettiin neljä näytettä. Rakenteesta A ei valmistettu näytteitä aiemmin mainitun liimausongelman vuoksi. Kuvassa 5.6 on esitelty koejärjestely. Kuvassa 5.7 nähdään nelipistetaivutusmittauksesta lasketut taivutuslujuuden arvot materiaaleille vaihteluvälineen.



**Kuva 5.6.** Nelipistetaivutuksen koejärjestely.



**Kuva 5.7.** Ydinaihioiden taivutuslujuudet virherajoineen.

Kaikki uudet rakennevaihtoehdot ylittävät referenssimateriaalin taivutuslujuuden arvon. Vertailtaviin rakenteiden hajoaminen tapahtui vedon alaisen pintalevyn pettämisen seurauksena. Käytännössä siis monikerrosrakenteiden pintalevyjen vetolujuudet rajoittavat taivutuslujuuden maksimiarvoa, ei kerrosten välisten liimasaumojen lujuus.

### 5.3.4 Kovuus

Oven pinnanlaatu määrytyy mm. ydinaihion kovuuden perusteella. Ydinaihion kovuutta testattiin Vickers kovuusmittauksella (ISO 6507-1:2005), missä kunkin näytteen pintaa painettiin pyramidin muotoisella timanttikärjellä tietyllä voimalla, jonka jälkeen mitattiin näytteen pintaan jääneen jäljen mitat. Näytteen pintaan painettiin jälki käyttäen Struers Duramin-A300 koelaitetta, jonka jälkeen painaumasta otettiin optisella mikroskoopilla (Leica MZ75) kuva. Kuvasta määritettiin näytteeseen syntyneen painauman mitat.

Vickersin kovuus voidaan laskea kaavalla

$$\text{Vickersin kovuus} = 0,102 \frac{2F \sin \frac{136}{2}}{d_V^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d_V^2} \quad (22)$$

missä  $F$  on koevoima [N] ja  $d_V$  on kappaleeseen syntyneen jäljen halkaisijan aritmeettinen keskiarvo [mm]. Kokeessa käytettiin eri koevoimia materiaalista riippuen. Pehmeimmät materiaalit painuivat suuremmilla voimilla liikaa ja kovempiin materiaaleihin ei syntynyt riittävää painumajälkeä pienemmillä koevoimilla. Eri koevoimilla suoritettut mittaukset ovat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia.

Taulukossa 5.2 on esitetty ydinaihioiden mitatut kovuudet. Kovuudet ovat mitattu rakenteiden pintalevyistä. Pintalevyt ovat mitattu siinä kunnossa, kun ne toimitetaan valmistajalta.

**Taulukko 5.2.** Ydinaihiomateriaalien Vickers kovuudet.

Pintamateriaali	Kovuus	Kovuuden tunnus ja koevoiman suuruus
Rakenne B, C ja G	0,4	HV 0,5
Rakenne D	1,2	HV 2
Referenssi	1,9	HV 2
Rakenne F	10	HV 3
Rakenne A ja E	13,6	HV 3

Huomataan, että materiaalien välillä on suuriakin eroja. Näiden tulosten valossa voidaan todeta, että käytettäessä tuotteen ydinaihiona rakenteita B, C tai G on tuotteen pinnanlaatu todennäköisesti parempi, kuin rakenteita A ja E käytettäessä. On kuitenkin vaikea arvioida, kuinka paljon tämänsuuruinen kovuusvaihtelu käytännössä vaikuttaa pinnanlaatuun.

### 5.3.5 Äänenabsorptiokyky

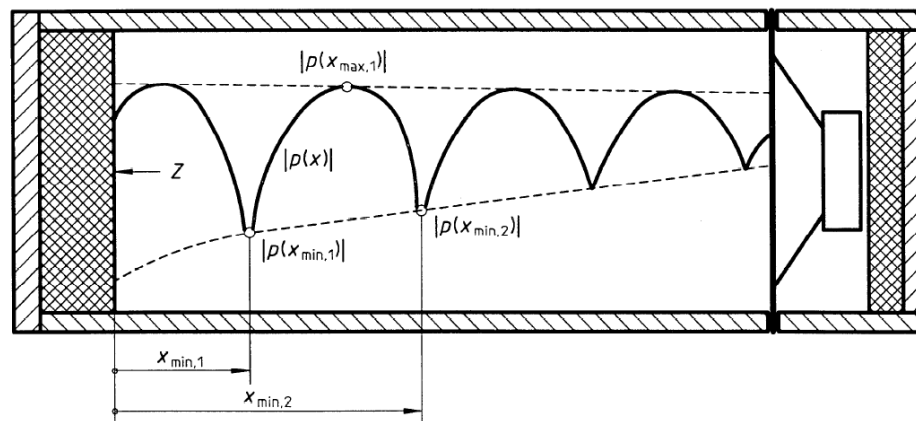
Äänenvaimennuskykyyn liittyvä äänenabsorptiokyky voidaan mitata pienistäkin näytteistä impedanssiputkea käyttäen. Impedanssiputki mittaa kappaleen

äänenabsorptiota eri taajuuksilla. Käytimme mittauslaitetta, joka mittaa äänenvaimennuskykyä taajuusalueella 100-1600 Hz. Näytteinä toimivat halkaisijaltaan noin 100 mm olevat pyöreät palat.

Impedanssiputkessa mitattavaa kappaletta kohti suunnataan halutun aallonpituuden ja amplitudin ääniaaltoja, joidenka takaisinheijastumista mitataan mikrofoniin avulla. Takaisinheijastuneiden ääniaaltojen avulla voidaan laskea materiaalin äänenabsorptio kyseisellä taajuudella. Äänentaajuutta muuttamalla saadaan mitattavasta materiaalista selville sen äänenabsorptiokyky eri taajuusalueilla.

Äänenabsorptiota mitattiin käyttäen Brüel & Kjærin impedanssiputkea 4002, joka on metallista valmistettu poikkileikkaukseltaan pyöreä putki, jonka toisessa päässä on kiinteä kaiutin ja jonka toisessa päässä irrotettava pääty. Putken sisällä on liikuteltava mikrofoni. Näyte asetetaan putken sisälle irrotettavasta päädyistä. Mittauksessa käytettiin pyöreitä näytteitä, joidenka halkaisija oli 99 mm. Näyte asetettiin standardin ISO 10534-1:2001 mukaisesti impedanssiputken päähän kiinni siten, että näyte istui tukevasti paikoillaan, olematta kuitenkaan puristuksissa. Näytteen takana oli liikuteltava teräksinen seinä, joka säädettiin näytteen paksuuden mukaan aina siten, että näytteen ja seinän väliin ei jäänyt ilmatilaa. Putkessa sijaitsevan kaiuttimen tuottamaa ääntä hallitaan signaaligeneraattorin avulla.

Impedanssiputkeen muodostetaan seisova aalto putkessa sijaitsevan kaiuttimen ja kaiutinta ohjaavan signaaligeneraattorin avulla. Putkeen muodostuu seisova aalto kaiuttimesta lähtevän aallon ja mitattavasta materiaalista heijastuvan aallon superpositiona. Äänen amplitudi näissä minimi- ja maksimikohdissa riippuu mitattavan näytteen äänenabsorptiokyvystä. Mitattavan materiaalin äänenabsorptio voidaan laskea määrittämällä äänenpaineen maksimi  $p_{\max}$  ja minimi  $p_{\min}$  kuvan 5.8 mukaisesti.



**Kuva 5.8.** Äänenpaine impedanssiputkessa. Seisova ääniaalto muodostuu putken vastakkaisissa päissä olevan kaiuttimen ja mitattavan näytteen välillä. Äänenpaine kussakin kohdassa määräytyy mitattavaan näytteeseen osuvan ja siitä heijastuvan ääniaallon superpositiona. [85]

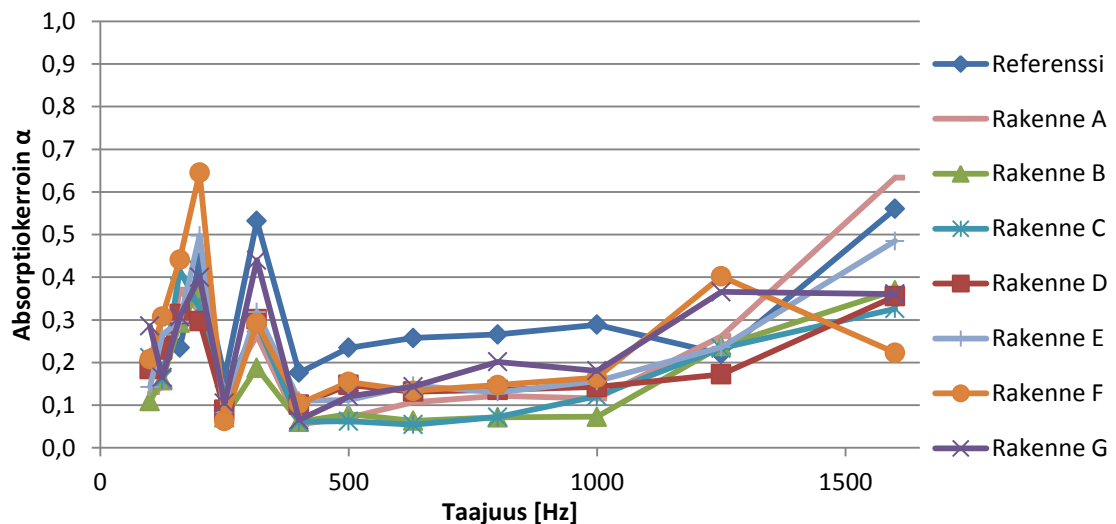
Pääsääntöisesti laskuissa käytetään äänenpaineen ensimmäistä minimiä sekä ensimmäisen ja toisen minimin väliin jäävää äänenpaineen maksimia yllä olevan kuvan

tavoin. Matalien taajuuksien tapauksessa ääniaallon aallonpituus on liian pitkä impedanssiputkellemme, jolloin maksimiarvona joudutaan käyttämään näytteen pintaa lähinnä olevaa äänenpaineen maksimia. Näytteen äänenabsorptio voidaan määrittää sijoittamalla mitatut äänenpaineen arvot yhtälöihin (23), (24) ja (4). [85]

$$s = \frac{|p_{\max}|}{|p_{\min}|} \quad (23)$$

$$|r| = \frac{s-1}{s+1} \quad (24)$$

Mittaukset toistetaan näytteelle terssikaistoittain taajuusalueella 100 – 1600 Hz standardin SFS-EN ISO 266:1997 mukaisesti. Tällöin näytteen äänenabsorptiosta saadaan hyvä kuva alhaisilla taajuuksilla. Äänenabsorptio saa lukuarvoja väliltä 0...1, suuremman lukuarvon tarkoittaessa parempaa absorptiokykyä. Kuvassa 5.9 on esitetty kaikkien testimateriaalien äänenabsorptiokerroin taajuuden funktiona.



**Kuva 5.9.** Ydinaihiomateriaalien äänenabsorptiokertoimet taajuuden funktiona.

Taajuusalueella 250 – 1000 Hz on referenssimateriaalillamme paras äänenabsorptiokyky. Aivan pienimmillä taajuuksilla on rakenteen F absorptio korkein ja suurimmilla taajuuksilla taas paras absorptio on rakenteella A.

Erot ovat kuitenkin melko pieniä, eikä millään materiaalilla yllätä riittävän korkeisiin absorptiolukemiin, jotta kuvassa 2.4 esitettyä äänitason alenemaa merkittävästi esiintyisi. Näiden materiaalien ääneneristyskyky perustuukin absorptiota enemmän äänen takaisinheijastamiseen ja absorboituneen äänen vaimentamiseen.

Oven ilmanääneneristys riippuu absorptiokertoimen lisäksi paljon myös rakenteen sisäisestä häviökertoimesta sekä resonanssitaajuuksista. Näitä on hyvin vaikea laskea moniosaiselle rakenteelle, jonka kaikkien osien ominaisuuksia ei tarkkaan tunneta. Kunkin näytteen ilmaääneneristysluku voidaan mitata luotettavasti vain kaiuntahuonetta käyttäen, kun näytteet saavat pintaansa vielä lasikuitulujitetun polymeerikerroksen.

## 5.4 Suuren mittakaavan testit

Suuren mittakaavan testeihin valittiin kaksi eri ydinaihorakennetta, joista molemmista valmistettaisiin kokonaiset ovet. Rakenteiden karsinnassa käytettiin hyväksi kappaleessa 5.2 saatuja tietoja. Lämmöneristysominaisuuksiensa vuoksi voitiin tässä vaiheessa rajata pois rakenteet B ja G. Rakenne F olisi neliömassaltaan liian painavaa oven valmistamiseksi, joten se jätettiin myös pois. Rakenne E olisi ollut mielenkiintoista testata, mutta alunperin testattavaksi valitut pintalevyt olivat vaurioituneet säilytyksessä, eikä tiukan aikataulun vuoksi korvaavia pintalevyjä ehditty saamaan.

Testattaviksi näytteiksi valikoitui siis rakenteet C ja D. Rakenne C on esitestien perusteella lämmöneristysominaisuuksiltaan selkeästi referenssimateriaalia parempaa. Näytteen kasvaneen neliömassan pitäisi myös parantaa ääneneristysominaisuuksia referenssimateriaaliin verrattuna. Rakenne D on myöskin lämmöneristysominaisuuksiltaan referenssimateriaalia parempi, vaikkakin vain vähän. Tämä rakenne myös on neliömassaltaan hieman referenssimateriaalia raskaampaa ja siten sen pitäisi parantaa ääneneristysominaisuuksia. Näiden molempien rakenteiden pintalevyjen kovuus on joko samaa tasoa referenssimateriaalin kanssa tai referenssiä matalampi. Näin ollen näiden tuotteiden pinnanlaadut pitäisi olla joko yhtä hyvät tai paremmat kuin referenssimateriaalissa.

Ovien pintoihin käytettiin tässä tapauksessa lasikuidulla vahvistettua polyesterihartsia. Fenolin paloa hidastavien ominaisuuksien testaaminen olisi ollut mielenkiintoista, mutta tässä työssä käytettyjen valmistuslaitteiden ja tuotantoprosessin kanssa yhteensopivan fenolihartsin löytäminen ei ollut mahdollista.

### 5.4.1 Näytteen valmistus

Suuren mittakaavan testeihin valmistettiin kaksi kokonaista ovea käyttäen kahta kilpailevaa ydinaihorakennetta. Molemmat ovet valmistettiin keskenään samalla tavalla. Ovien ydinaihiot valmistettiin liimaamalla pintalevyjen väliin ylimääräinen kerros kappaleessa 5.2 kuvatulla tavalla. Tämä aiheutti yhden ylimääräisen työvaiheen. Oven liimauksessa huomioitiin erityisesti liiman tasainen jakautuminen sekä pintalevyjen väliin jäävien rakojen minimointi. Molemmat ydinaihiot olivat 35-36 mm paksuja.

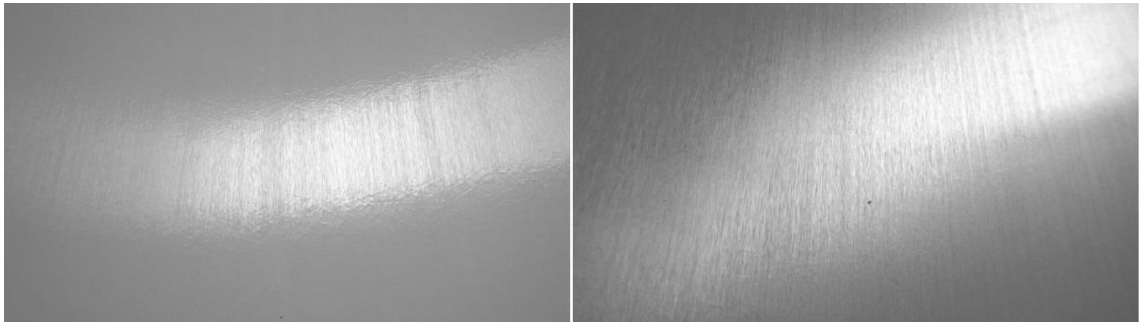
Molempiin oviin asennettiin palotiivisteet oven kaikille reunoille sekä saranoiden vaatimat vahvikkeet oven toiselle reunalle. Tämän jälkeen oveen asennettiin saranat sekä lukkopesä.

### 5.4.2 Pinnanlaatu

Ennen kokeiden suorittamista ovien pinnanlaadut tarkistettiin visuaalisesti. Pinnanlaadussa oli huomattava ero rakenteen C hyväksi. Rakenteen C pinnanlaatu oli erittäin hyvä, kun taas rakenteen D pinnasta saattoi helposti havaita pinnan



polymeerikerroksen lujittamiseen käytettyä lasikuitua. Pinnanlaadun erot ovat selvästi havaittavissa kuvassa 5.10.



**Kuva 5.10.** Ovien pinnanlaaduissa oli huomattava ero rakenteen C hyväksi. Vasemmalla rakenne D, oikealla rakenne C.

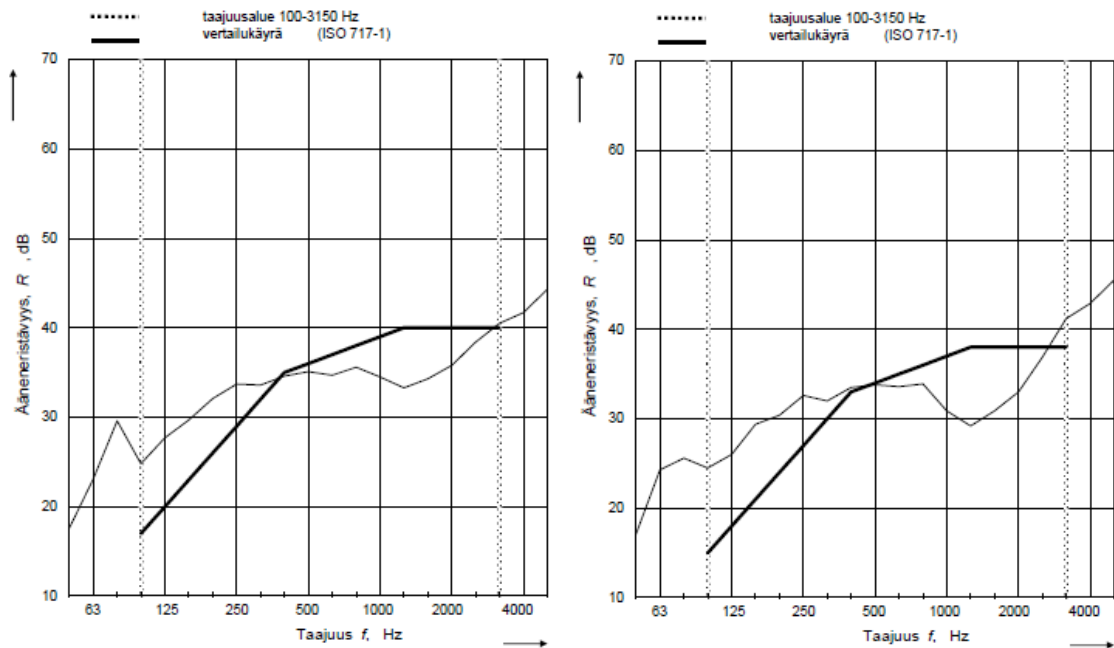
Ero selittynee pintalevyjen kovuuseroilla; kovempi pintalevy tuo lasikuidun selkeämmin esiin, kun taas pehmeämmän pintalevyn pintaan lasikuitu uppoaa helpommin ja mahdollistaa tasaisemman ulkopinnan.

#### 5.4.3 Ääneneristävyys (ISO 717-1: 2013)

Oville suoritettiin ääneneristysmittaus VTT:n mittauslaboratoriossa Otaniemessä. Mittauksessa kiinnitettiin karmi oviaukkoon ja oviaukon ja karmin välinen tila tilkittiin. Ovi asennettiin karmissa oleville saranoille ja oven lukkopesään kiinnitettiin kahva. Oven ja karmin välissä oli perinteinen ovitiiviste.

Oven molemmilla puolilla oli suljetut huoneet, joissa molemmissa oli mikrofonit ja vain toisessa kaiuttimet. Mikrofonien avulla voitiin määrittää äänen lähtötaso kaiutinhuoneessa sekä toiseen huoneeseen oven läpi kulkeutunut melu. Mittaus suoritettiin terssikaistoittain taajuusalueella 100 – 3150 Hz. Mittaustuloksena saatiin käyrä, jolle sovitettiin standardeista löytyvä vertailukäyrä. Vertailukäyrää käyttämällä voidaan oven ääneneristävyys ilmaista yhdellä lukuarvolla ( $R_w$ ). Mittaus toistettiin molemmille oville oven ja karmin väli tiivistettynä, jolloin oven huono istuvuus karmissaan voitiin rajata pois virhelähteistä. Mittauksen yhteydessä ovet punnittiin ja niiden pinta-alat mitattiin. Koehuoneiden ilmankosteus, ilmanpaine ja lämpötila mitattiin. Lähettävän ja vastaanottavan huoneen tilavuudet olivat jo ennestään tiedossa. Mittaustulokset ovat esitetty kuvassa 5.11.

Massaltaan suurempi rakenne C osoittautui ääneneristävyydeltään rakenne D:tä paremmaksi. Molemmilla rakenteilla näkyi ääneneristävyysalenenema 1250 Hz taajuudella. Tällä taajuudella on ovien koinsidenssin rajataajuus, johon voi vaikuttaa oven taivutusjäykkyyttä tai neliömassaa muuttamalla. Rakenne D:llä mitattu ääneneristykseen suurempi alenenema koinsidenssin rajataajuudella johtuu rakenteen alhaisemmasta neliömassasta rakenne C:hen verrattuna.



**Kuva 5.11.** Ääneneristysmittaustulokset (ISO 717-1) molemmille testatuille oville. Vasemmalla rakenne C ( $R_w$ -luku 36 dB) ja oikealla rakenne D ( $R_w$ -luku 34 dB).

Ääneneristävyyttä voisi parantaa kerrosten välistä liimausta muuttamalla. Liimauspinta-alaa pienentämällä jäisi levyjen väliin pieni ilmarako, joka oleellisesti vähentäisi rakenteen läpi kulkeutuvaa pitkittäistä aaltoliikettä. Tällöin rakenne muistuttaisi kaksinkertaista rakennetta, joka leikkaisi etenkin korkeita taajuuksia. Liimauspinta-alan pienentäminen myös alentaisi rakenteen taivutusjäykkyyttä, jolloin koinsidenssin rajataajuus siirtyisi eri alueelle. Liimausta muuttamalla voisi ääneneristävyysluku  $R_w$  kasvaa 5-10 dB, mutta toisaalta oven palonesto-ominaisuudet kärsisivät merkittävästi, kun ovi ei pysyisi polttokokeessa enää kasassa puutteellisen liimauksen vuoksi.

#### 5.4.4 Polttokoe (EN 1363-1:2012)

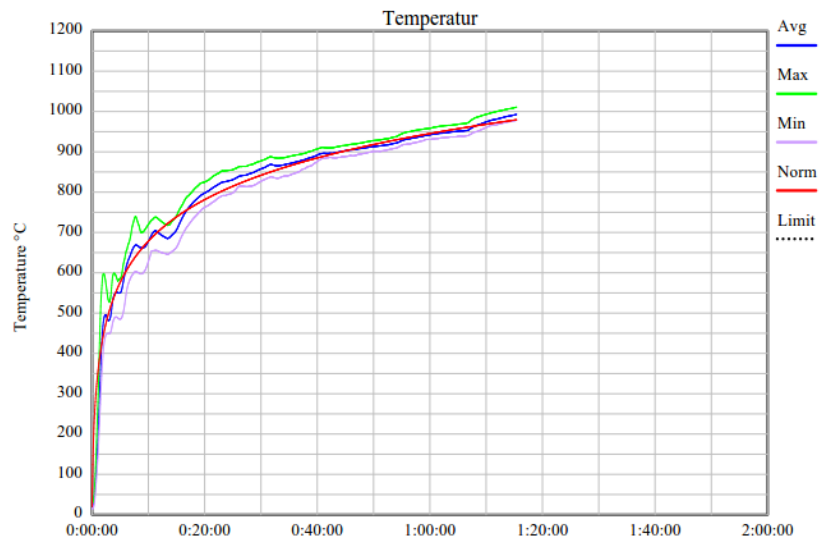
Polttokoe suoritettiin TÜV-hyväksytyssä polttolaitoksessa Virossa. Ovet kiinnitettiin karmeineen liikuteltavaan muurattuun soraharkkoseinään. Karmien ja seinän väliset aukot tilkittiin palovillalla ja lämpöä kestäväällä tiivistemassalla. Oviin ja karmeihin kiinnitettiin liimaamalla termoelementtejä EN 1363-1:2012 standardin vaatiman määrän standardin vaatimiin paikkoihin. Termoelementtien kiinnittämiseen käytetyn liiman ja karmien tiivistämiseen käytetyn tiivistemassan annettiin kuivua noin vuorokauden ennen polttokokeen aloittamista. Polttokoe suoritettiin molemmille testattaville oville samanaikaisesti. Lisäksi polttokammion puolelta mitattiin polttokammion lämpötilaa sekä painetta eri korkeuksilla.

Ennen polttokokeen alkua muurattu seinä ovineen siirrettiin polttokammion suulle nosturin avulla. Polttokammion sisustaa huuhdeltiin ilmapuhalluksella kymmenen minuutin ajan lämpötilaerojen tasaamiseksi. Tässä vaiheessa ovien ulkopinnat todettiin

olevan keskenään saman lämpöisiä. Polttokoe alkoi, kun polttokammion sisällä olevat etäohjatut kaasupolttimet sytytettiin palamaan. Kokeen keston ilmaisi polttokammion vierellä sijainnut digitaalinen kello. Koe taltioitiin kokonaisuudessaan videokameralla.

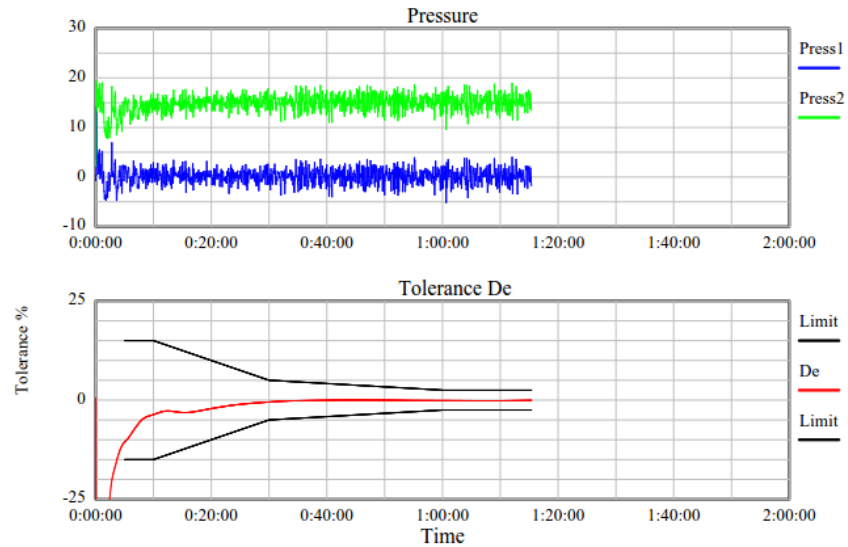
Polttokokeen aikana seurattiin ovien taipumaa. Molempien ovien taipumat alittivat standardin määrittelemän taipuman ylärajan. Rakenne C säilytti muotonsa erittäin hyvin, mikä taas mahdollistaa palotiivisteiden tehokkaamman toiminnan, kun oven ja karmin välinen rako säilyy pienenä. Tämä edelleen hidastaa palon ja palokaasujen leviämistä oikeassa rakennuspalossa.

Lämpötila nousi polttokammiossa kuvan 5.12 mukaisesti. Havainnollistamisen helpottamiseksi on samaan kuvaan piirretty myös EN 1363-1:2012 standardin määrittelemä lämpötiläkäyrä.



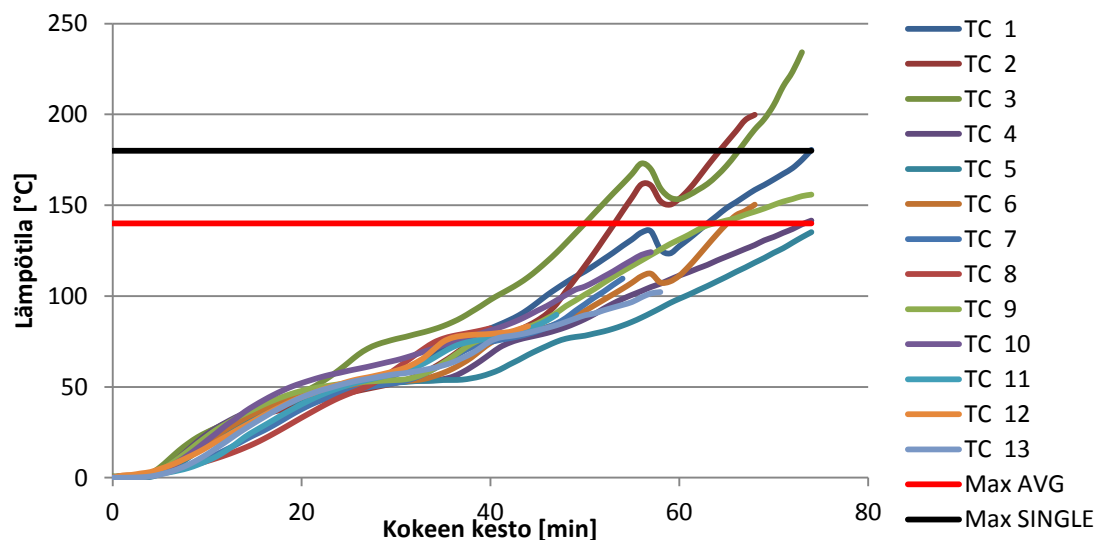
**Kuva 5.12.** Polttokokeessa mitattu polttokammion lämpötila. Punainen käyrä kuvastaa standardin EN 1363-1:2012 määrittämää polttokammion tavoitelämpötilaa. Kuvasta puuttuu katkoviivalla merkitty Limit-käyrä.

Kuvassa 5.13 on kuvattu kahdelta eri korkeudelta mitattu polttokammion ja vastaavalta korkeudelta polttokammion ulkopuolelta mitatun ilmanpaineen paine-ero ajan funktiona. Paine-eron nollakohta sijaitsee 500 mm korkeudella polttokammion lattiasta mitattuna. Paine-ero on todettu mahtuvan standardin EN 1363-1:2012 asettamiin toleransseihin.



**Kuva 5.13.** Polttokammion painekäyrä mittauksen ajalta, mitattuna kahdelta eri korkeudelta sekä näiden mittauspisteiden paine-eron vertailua standardin EN 1363-1 määrittelemiin toleransseihin.

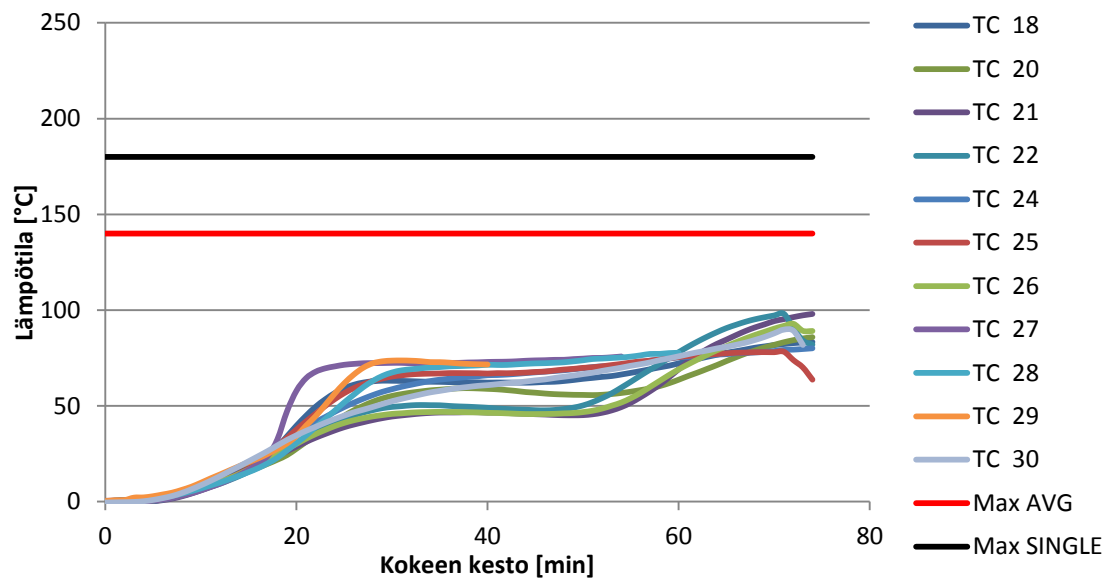
Molempien ovien pintalämpötiloja seurattiin termoelementeillä. Rakenne D osoittautui rakennetta C nopeammin lämpiäväksi. Rakenteen D kohdalla koe päättyi noin 65 minuutin kohdalla, kun yksittäisen termoelementin lämpötila nousi 180 °C yli ympäröivän huoneenlämpötilan kuvan 5.14 mukaisesti. Kuvassa esiintyvät lämpötilan nopeat alenemiset johtunevat kertaluontoisesta kokeen aikana suoritetusta termoelementtien uudelleenpainamisesta ovilevyä vasten, jolla oveen liimalla kiinnitettyjen termoelementtien kiinnipysyvyys varmistettiin.



**Kuva 5.14.** Rakennevaihtoehto D:n pinnan lämpötilan kehitys ajan funktiona polttokokeen aikana. Osa termoelementeistä irtosi oven pinnasta kokeen aikana. Näiden esittämät lämpötilakäyrät ovat katkaistu termoelementin irtoamishetkeen. Punainen ja musta vaakaviiva kuvaavat lämpötilarajoja, jotka ylittyessään päättävät polttokokeen. Punainen on oven keskilämpötilan raja ja musta yksittäisen termoelementin raja.

Rakenne C:n pintalämpötilat nousivat suhteellisen tasaisesti läpi kokeen, eikä suuria hyppäyksiä pintalämpötilassa havaittu. Oven lämpötilan kehitys on esitetty kuvassa 5.15.

Virallisesti polttokoe tulee päättää, mikäli pinnan lämpötilat nousevat liian suuriksi tai jos pinta syttyi palamaan eikä sammu 10 sekunnin sisällä. Koe päätettiin 75 minuutin kohdalla, kun ovea ympäröinyt karmi syttyi palamaan. Itse ovi oli edelleen tiiviisti karmissa kiinni, eikä esimerkiksi palokaasuja päässyt ovenraosta pakenemaan. Oven keskimääräinen pintalämpötila oli tässä vaiheessa vain noin 85 °C.



**Kuva 5.15.** Rakenne C:n pintalämpötilan kehitys polttokokeen aikana. Lopussa havaittu pintalämpötilan notkahdus johtuu ovikarmin sammutuksessa käytetyn heikon vesisuihkun osumisesta termoelementteihin. Punainen ja musta vaakaviiva kuvaavat lämpötilarajoja, jotka ylittyessään päättävät polttokokeen. Punainen on oven keskilämpötilan raja ja musta yksittäisen termoelementin raja.

Polttokokeen jälkeen polttokammio avattiin ja ovia tarkasteltiin polttokammion puolelta. Rakenne C oli kestänyt polttokokeen rasitukset rakennetta D paremmin. Etenkin rakenteen D suurelta alueelta murtunut pintalevy oli yllätys. Hajoamisen syy jäi epäselväksi. Rakenteessa saattoi olla valmistusprosessista tai raaka-aineista peräisin olevia jäännösjännityksiä tai sitten rakenteen nopea lämpenemisnopeus saattoi olla tälle rakenteelle liikaa. Lasikuitulujitettu polyesteriharts, mitä käytetään ovien pinnalla kulutuskestävyyden ja ulkonäön parantamiseksi, oli vaurioitunut. Polyesteriharts oli palanut lasikuitujen välistä pois, jolloin kuitujen väliset liitokset eivät ole riittäneet pitämään lasikuitumattoa ehjänä paikoillaan koko ovilevyn alueella. Lasikuitua puuttui suurempi palanen rakenteen D ovesta. Tämän oven murtunut pintalevy on irrotessaan todennäköisesti tiputtanut lasikuidun ovesta.

## 5.5 Yhteenveto

Esikarsintatesteissä onnistuttiin löytämään selkeitä eroja ydinaihiomateriaalien välille. Esikarsintatestien perusteella onnistuttiin karsimaan sellaiset vaihtoehdot pois, jotka toimivat huonommin kuin referenssimateriaali. Tärkeimpänä yksittäisenä kokeena pidettiin lämmöneristyskoetta, jonka tulosten perusteella pyrittiin tekemään materiaalivalinta suuren mittakaavan kokeisiin. Valitettavasti materiaalitoimitusongelmien vuoksi ei suuren mittakaavan kokeisiin voitu valita kuin toinen lämmöneristyskokeessa parhaiten pärjänneistä materiaaleista. Myös kovapintaisten rakenteiden A ja E pinnanlaatu jäi tästä syystä tällä erää kysymysmerkiksi.

Suuren mittakaavan testeihin valituista kahdesta ovirakenteesta on löydetty selkeä voittaja. Rakenne C on oleellisesti parempi kaikilta tärkeiltä ominaisuuksiltaan rakenne D:hen verrattuna. Etenkin CR-matriisilla määritellyt tärkeät pinnanlaatu- ja lämmöneristysominaisuudet ovat aiemmin mainitulla vaihtoehdolla paremmat.

Verrattaessa rakenteen C ominaisuuksia referenssimateriaaliin, voidaan todeta oven painoa lukuun ottamatta kaikkien ominaisuuksien parantuneen. Mekaaniset ominaisuudet ovat uudella rakennevaihtoehdolla referenssimateriaalia paremmat, joten valmistuksessa eikä käytössä pitäisi ilmetä ongelmia. Rakenteen C  $R_w$ -luku on hyvä (36 dB), mikä johtaa referenssimateriaaliin verrattuna noin 50 % pienempään äänenläpäisevyyteen. Kuitenkin valmiin oven neliömassa kasvaa tällöin noin 28 %.

Rakenteen D ominaisuudet eivät sen sijaan olleet riittävällä tasolla referenssimateriaaliin verrattuna. Mekaaniset ominaisuudet ja ääneneristysominaisuudet kyllä paranivat, mutta samalla tuotteen pinnanlaatu heikkeni, sekä neliömassa ja materiaalikustannukset kasvoivat.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tarkoituksena oli kehittää uusi polymeerinen palo-ovi. Tavoitteena oli saavuttaa merkittävä parannus palonkesto-ominaisuuksiin referenssipalo-oveen verrattuna. Palo-ominaisuuksien lisäksi uuden tuotteen tulisi säilyttää hyvä pinnanlaatu ja ääneneristysominaisuudet tai jopa parantaa niitä referenssioveen nähden. Uuden tuotteen fyysiset ominaisuudet eivät saa muuttua liikaa, jotta oven valmistaminen on edelleen mahdollista.

Työssä pyrittiin selvittämään ne materiaaliominaisuudet, jotka vaikuttavat oven lopullisiin tuoteominaisuuksiin. Näiden materiaaliominaisuuksien avulla voitiin rajata markkinoilla saatavilla olevista raaka-aineista tähän applikaatioon sopimattomia vaihtoehtoja pois. Työssä myös pohdittiin, voisiko materiaalivaatimukset jakaa eri rakennekerroksille, jolloin oven hyvät ominaisuudet saavutettaisiin halvemmilla raaka-aineilla. Myös tuotantomenetelmän aiheuttamat vaatimukset rajasivat materiaalivaihtoehtoja.

Työssä valittiin yhteensä kahdeksan eri oven sisustan materiaali- ja rakennevaihtoehtoa, joille suoritettiin esikarsintatestejä niiden ominaisuuksien selvittämiseksi. Testien perusteella materiaalivaihtoehtojen välillä oli suuriakin eroja. Näistä materiaaleista valittiin suuren mittakaavan kokeisiin ne materiaalit, jotka olivat tuotantokelpoisia, joita oli saatavilla ja joilla oli referenssimateriaalia paremmat lämmöneristysominaisuudet. Oven pinnassa käytettävän polymeeriin ja lujitteeseen ei sen sijaan puututtu.

Suuren mittakaavan koekappaleissa arvioitiin ensin tuotantokelpoisuutta ja pinnanlaatua. Tämän lisäksi niiden ääneneristysominaisuudet ja palonkesto testattiin riippumattoman laboratorion toimesta. Työn tuloksena löydettiin uusi ovirakenne, jonka tärkeimmät ominaisuudet ovat referenssimateriaaliin verrattuna selkeästi parantuneet. Uuden rakenteen palokesto-ominaisuudet ovat noin 100% paremmat, pinnanlaatu yhtä hyvä tai parempi ja mekaaniset ominaisuudet paremmat. Äänenläpäisevyys laski noin 50%:lla referenssimateriaaliin verrattuna.

Esikarsintatesteissäkin ilmenneet näytteiden halkeamiset ja siihen vaikuttaneet syyt jäivät kuitenkin hieman epäselviksi. Halkeilu saattoi johtua näytteen pinnan liian nopeasta lämpenemisestä tai näytteen keskikohdan ja reunojen välisestä suuresta lämpötilaerosta. Muilta osin onnistuttiin löytämään materiaalin ja lopputuotteen ominaisuuksien väliltä yhteys.

Harmillisesti kaikkia ideoita ei päästy työssä kokeilemaan. Tuotteen pinnoittamiseen käytettyä polymeeriä tai polymeerin lujittamiseen käytettyä kuitutyyppiä vaihtamalla voidaan todennäköisesti tuotteen palonesto-ominaisuuksia vielä hieman parantaa.

Kokonaisuutena voidaan todeta, että työn tavoitteista onnistuttiin täyttämään tärkeimmät. Tuotteen toiminnan kannalta tärkeintä osa-aluetta on onnistuttu parantamaan ilman, että raaka-ainekustannukset nousevat merkittävästi. Suuren mittakaavan testeissä paremmin pärjännyttä tuotetta voidaan valmistaa tässä työssä käytetyin tuotantomenetelmin vain parilla lisätyövaiheella. Yhteistyön kehittäminen raaka-ainetoimittajien kanssa voi mahdollistaa myös ovituotantoon paremmin sopivien levykokojen ostamisen ja sitä kautta työvaiheiden vähentämisen. Ovilevyn sijaan seuraavaksi tulisi kiinnittää huomiota polttokokeessa palamaan syttyneeseen oven karmiin, jotta ovilevyn täysi potentiaali voidaan hyödyntää. Tämän oven kaupallistaminen on todennäköisesti mahdollista varsin pienin muutoksin.



## LÄHTEET

1. The Geneva Association. World Fire Statistics. 2011. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavissa: <https://www.genevaassociation.org/media/186303/ga2011-fire27.pdf>
2. Sisäministeriö / Pelastusosasto. Palokuolematilastot Suomessa. 2015. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavissa: <http://www.pelastustoimi.fi/turvatietao/ehkaise-palon-syntyminen/tulipalon-vaarallisuus/palokuolemat>
3. Electronic Access Control. Norman, T. 2011. ISBN 978-0-12-382028-0,
4. Tampereen teknillinen yliopisto. MOL-1600 Komposiitit. Luentoaineisto 2011, TTY. Julkaisematon.
5. Tampereen teknillinen yliopisto. MOL-1300 Keraamit. Luentoaineisto 2007, TTY. Julkaisematon.
6. McVicker Associates, Inc. Bending in a beam. 2013. [WWW]. [Viitattu 16.6.2015]. Saatavissa: <http://www.mcvicker.com/vwall/page005.htm>
7. TTY, Lujitemuovitekniikka eri aloilla, testaus. 2010. [WWW]. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa <https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/MAMK/MPDF/Testaus.pdf>
8. SFS-EN ISO 14704. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Test method for flexural strength of monolithic ceramics at room temperature. Sveitsi 2008. 34 s.
9. Talonrakentamisen akustiikka, Tutkimusraportti 137. Kylliäinen, M. Rakennetekniikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto. 2006. 205 s.
10. Sound and Vibration. Royal Institute of Technology.
11. Ljud och Vibrationer, Bodén, H. Carlsson, U., Glav, R., Wallin, H.-P., Åbom, M. Kungliga Tekniska Högskolan/Institutionen för farkostteknik. 1999. ISBN 9789171703444. 409s.
12. Noise Control. Transmission of sound through structures. Lamancusa, J. S. 2000. Penn State University.
13. Architectural Acoustics: Principles and Practice. Cavanaugh, W. J., Tocci, G. C., Wilkes, J. A. John Wiley & Sons. 1999. 322 s.
14. Investigating the acoustical properties of carbon fiber-, glass fiber-, and hemp fiber reinforced polyester composites. Jalili, M. M., Mousavi, S. Y., Pirayeshfar, A. S.. Polymer composites, Volume 25, Issue 11. 2014. s. 2103-2111.
15. Äänenvaimennus. Paroc. [WWW]. [Viitattu 13.4.2015]. Saatavissa: <http://www.paroc.fi/knowhow/aani/aanenvaimennus>
16. National Physics Laboratory. 2015. Building Acoustics. [WWW]. [Viitattu 19.5.2015]. Saatavissa: [http://www.kayelaby.npl.co.uk/general\\_physics/2\\_4/2\\_4\\_4.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_4/2_4_4.html)
17. Acoustics. 2009. [WWW]. [Viitattu: 26.5.2015]. Saatavilla: [https://svetlanaroit.files.wordpress.com/2009/11/about\\_materials1.pdf](https://svetlanaroit.files.wordpress.com/2009/11/about_materials1.pdf)

18. Tampereen teknillinen yliopisto. MOL-5170 Muovimateriaalit. Luentoaineisto 2010, TTY. Julkaisematon.
19. Sound and vibration damping with polymers. Corsaro, R.D., Sperling, L.H. American Chemical Society. 1990. ISBN 978-0841217782. 480 s.
20. Sound insulation of gypsum board in practice, Losso, M., Viveiros, E. 2005. The 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Rio de Janeiro, Brazil
21. Fläkt Woods Practical Guide to Noise Control. Ninth Impression. Sharland, I. Fläkt Woods Limited, Colchester, England, 2005. 208 s.
22. The influence of gaps of fire-resisting doors on the smoke spread in a building fire. Cheung, S. C. P., Lo, S. M., Yeoh, G.H., Yuen, R. K. K. Fire Safety Journal. 2006. s. 539 – 546.
23. Review in Sound Absorbing Materials. Sagartzazu, X., Hervella, L., Pagalday, J. M. s. 81.
24. Application of active noise control to an elevator cabin. Landaluze, J., Portilla, I., Pagalday, J. M., Martínez, A., Reyero, R. 2003. Control Engineering Practice 11. s. 1423-1431.
25. Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics. 13. painos. Young, H.D., Freedman, R.A., Ford, A.L. Addison-Wesley. 2012. 1598 s.
26. Fire Resistance. Instituto Giordano. [WWW]. [Viitattu 5.12.2014]. Saatavilla: <http://www.giordano.it/2cm-100027-fire-division.php>
27. SFS EN 1363-1. Palonkestävyystestit. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2000 Helsinki.
28. ASTM 119E: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. 2000 ASTM International.
29. Limitations of the standard fire test. Steel Construction. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015] Saatavilla: [http://www.steelconstruction.info/Fire\\_testing](http://www.steelconstruction.info/Fire_testing)
30. Valerius Comenico. Steel Door. 2014. [WWW]. [Viitattu 24.6.2015]. Saatavilla: <http://todayyesterdayandtomorro.blogspot.fi/2014/04/steel-door.html>
31. Elevated-Temperature Properties of Stainless Steels, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM Handbook, Vol 1. ASM International, 1990, s. 930–949
32. Study of the Fire Resistance Performance of a Kind of Steel Fire Door. Wu, X., Liu, J., Zhao, X., Yang, Z., Xu, R. Procedia Engineering 52 (2013). s. 440-445.
33. Steel Door Institute. Fire Rated Doors and Frames. 2014. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavilla: <http://www.steeldoor.org/res/Fire%20Rated%20Doors%20and%20Frames%20Overview.pdf>
34. Interdoor. Steel Fire Doors. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015] Saatavilla: <http://ny.interdoor.com/products/fire-doors>
35. Simpson Door Company. Fire-Rated Doors. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavilla: <http://www.simpsondoor.com/door-series/interior/fire-rated-doors/>

36. Aspen Aerogel. Aerogel Provides Thermal Insulation and Fire Protection for Airplane Firewall (Case Study). 2008. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavilla:  
[http://www.aspenaerogels.com.tr/markets/Case\\_Study\\_Plane\\_web.pdf](http://www.aspenaerogels.com.tr/markets/Case_Study_Plane_web.pdf)
37. Aspen Aerogel. Aerogel Insulation Improves Both Fire Protection and Thermal Performance (Case Study). 2010. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavilla  
[http://www.aerogel.com/\\_resources/common/userfiles/file/Case\\_Study\\_Regap\\_Fire\\_Protection\\_web.pdf](http://www.aerogel.com/_resources/common/userfiles/file/Case_Study_Regap_Fire_Protection_web.pdf)
38. BCC Research. Aerogels. Report code AVM052B. [WWW]. [Viitattu 29.12.2014] Saatavilla: <http://www.bccresearch.com/market-research/advanced-materials/aerogels-avm052b.html>
39. Aerogel Technologies. Frequently Asked Questions. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavilla <http://www.aerogeltechnologies.com/faqs>
40. Aspen Aerogel. All Insulation Products. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavilla <http://www.aerogel.com/products-and-solutions/all-insulation-products/>
41. Tech Briefs. Silicon Oxycarbide Aerogels for High Temperature Thermal Insulation. 2009. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015] Saatavilla:  
<http://www.techbriefs.com/component/content/article/5-ntb/tech-briefs/materials/6570>
42. Berkeley Lab. Silica AeroGels. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavilla:  
<http://energy.lbl.gov/ecs/aerogels/sa-thermal.html>
43. Hexcel Composites. HexWeb™, Honeycomb Attributes and Properties. A comprehensive guide to standard Hexcel honeycomb materials, configurations, and mechanical properties. 2010. [WWW]. [Viitattu 5.12.2014]. Saatavilla  
[http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf)
44. Hexcel Composites. HexWeb® HRH-10 Aramid Fibre/Phenolic Honeycomb Product Data. 2015. [WWW]. [Viitattu 13.11.2014]. Saatavilla  
[http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Honeycomb-Data-Sheets/HRH\\_10\\_eu.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Honeycomb-Data-Sheets/HRH_10_eu.pdf)
45. Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing. Bitzer, T. Springer-Science+Business, B.V. 1997. ISBN: 978-94-010-6474-3. 233 s.
46. Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation. Zukowskia, M., Haeseb, G. Energy and Buildings 42 (2010). s. 1402–1408
47. Lightweight structural cores. Kindlinger, J. ASM Handbook, Vol 21. 2001. s. 180-183
48. Intumex. Intumex® L – Fire Protection Laminate. 2010. [WWW]. [Viitattu 30.12.2014]. Saatavilla: [http://www.intumex.at/media/ds-intumex-l\\_en\\_06\\_10.pdf](http://www.intumex.at/media/ds-intumex-l_en_06_10.pdf)

49. Intumex. Intumex<sup>®</sup> LFC – Fire Protection Laminate. 2013. [WWW]. [Viitattu 30.12.2014]. Saatavilla: [http://www.intumex.at/media\\_editor/Installation\\_EN/Intumex\\_LFC\\_data\\_sheet\\_EN\\_2013.03.07.pdf](http://www.intumex.at/media_editor/Installation_EN/Intumex_LFC_data_sheet_EN_2013.03.07.pdf)
50. Intumex. Intumex<sup>®</sup> LW – Fire Protection Laminate. 2013. [WWW]. [Viitattu 30.12.2014]. Saatavilla: [http://www.intumex.at/media\\_editor/Installation\\_EN/Intumex\\_LW\\_data\\_sheet\\_EN\\_2013.03.07.pdf](http://www.intumex.at/media_editor/Installation_EN/Intumex_LW_data_sheet_EN_2013.03.07.pdf)
51. Intumex. Intumex<sup>®</sup> LXP – Fire Protection Laminate. 2015. [WWW]. [Viitattu 30.12.2014]. Saatavilla: [http://www.intumex.at/media/intumex\\_lxp\\_tds.pdf](http://www.intumex.at/media/intumex_lxp_tds.pdf)
52. Raitatuote. Marvon -palotiivisteet. 2014. [WWW]. [Viitattu 30.12.2014]. Saatavilla: [http://www.raitatuote.fi/core/wp-content/uploads/2012/08/Raitatuote\\_Marvon-Palotiivisteet\\_FINAL\\_web.pdf](http://www.raitatuote.fi/core/wp-content/uploads/2012/08/Raitatuote_Marvon-Palotiivisteet_FINAL_web.pdf)
53. Fire Retardancy of Polymers: New Strategies and Mechanisms. Hull, T.R., Kandola, B.K. 2009. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK. 433 s.
54. New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., J.-M. Lopez-Cuesta, J.-M., Dubois, Ph. Materials Science and Engineering T 63 (2009), s. 100-125
55. Properties of Polymers. Van Krevelen, D.W., te Nijenhuis, K. 2009. Elsevier, Alankomaat. ISBN 978-0-08-054819-7. 1030 s.
56. Plastics Technology Handbook. Chanda, M., Roy, S. K. CRC Press 2006. ISBN: 978-0-8493-7039-7. 896 s.
57. Polymer Flammability. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. 2005. 82 s.
58. Heat Release of Polymer Composites in Fire. Mouritz, A.P., Mathys, Z., Gibson, A.G. Composites: part A 37 (2006) s. 1040-1054.
59. Laird Technologies. UL94 – Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances. Gold, C. [WWW]. [Viitattu 22.12.2014]. Saatavissa: <http://www.lairdtech.com/brandworld/library/EMI%20UL-94%20Test%20for%20Flammability%20of%20Plastic%20Materials%20for%20Parts%20in%20Devices%20and%20Appliances%20Technical%20Note%20Download.pdf>
60. PEEK polymer flammability and the inadequacy of the UL-94 classification. Patel, P., Hull, T. R., Moffatt, C. Fire and Materials 36 (2012). s. 185-201
61. Solvay. Torlon PAI Design Guide. [WWW]. [Viitattu 22.12.2014]. 48 s. Saatavissa: [http://drakeplastics.com/DPG\\_Torlon\\_Design\\_Guide\\_EN.pdf](http://drakeplastics.com/DPG_Torlon_Design_Guide_EN.pdf)
62. Plastic Materials for Packaging: Developments in Markets, Materials & Processes. Barnetson, A. Rapra Technology Ltd. 1996. 125 s. ISBN: 1-85957-068-2
63. DuPont<sup>™</sup> Zytel<sup>®</sup> Nylon Resin. [WWW]. [Viitattu 22.12.2014]. Saatavissa: <http://plastics.dupont.com/plastics/pdf/europe/zytel/ZYTTPPe.pdf>

64. Polymer Green Flame Retardants: A Comprehensive Guide to Additives and Their Applications. Papaspyrides, C. D., Kiliaris, P. 2014. Elsevier, Alankomaat. ISBN 978-0-444-53808-6. 942 s.
65. SP Technical Research Institute of Sweden. ISO 5660-1 & 2 – Cone calorimeter, heat release and smoke production. [WWW]. [Viitattu 19.6.2015]. Saatavissa: [http://www.sp.se/en/index/services/firetest\\_building/firetest\\_bu%C3%ADding/iso\\_5660\\_konkalorimeter/sidor/default.aspx](http://www.sp.se/en/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADding/iso_5660_konkalorimeter/sidor/default.aspx)
66. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption. Huggett, C. 1980. Fire and Materials, vol. 4, no. 2. s. 61-65
67. Recent developments in flame retardant polymeric coatings. 2013. Liang, S., Matthias Neisius, N., Gaan, S. Progress in Organic Coatings 76 (2013). s. 1642–1665
68. Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers. Lu, S.-Y., Hammerton, I. Progress in Polymer Science 27 (2002). s. 1661-1712.
69. Effects of developmental exposure to 2,2',4,4',5-pentabromodiphenyl ether (PBDE-99) on sex steroids, sexual development, and sexually dimorphic behavior in rats. Lilienthal, H., Hack, A., Roth-Härer, A., Grande, S.W., Talsness, C.E. Environ Health Perspect. 2006 Feb. s. 194-201.
70. In utero and lactational exposures to low doses of polybrominated diphenyl ether-47 alter the reproductive system and thyroid gland of female rat offspring. Talsness, C.E., Kuriyama, S.N., Sterner-Kock, A., Schnitker, P., Grande, S.W., Shakibaei, M., et al. Environ Health Perspectives. 2008 Mar. s. 308–314.
71. Immunotoxicity of the commercial polybrominated diphenyl ether mixture DE-71 in ranch mink (*Mustela vison*). Martin, P.A., Mayne, G.J., Bursian, F.S.J., Tomy, G., Palace, V., Pekarik, C., et al. Environmental Toxicology and Chemistry. 2007 May. s. 988–997.
72. Effects of decabrominated diphenyl ether (DBDE) on developmental immunotoxicity in offspring mice. Watanabe, W., Shimizu, T., Hino, A., Kurokawa, M. Environ Toxicol Pharmacology, Volume 36, Issue 3. 2008 Nov. s.315–319.
73. Neonatal exposure to polybrominated diphenyl ether (PBDE 153) disrupts spontaneous behaviour, impairs learning and memory, and decreases hippocampal cholinergic receptors in adult mice. Viberg, H., Fredriksson, A., Eriksson, P. Toxicology and Applied Pharmacology. 2003 Oct. s. 95–106.
74. Neonatal exposure to deca-brominated diphenyl ether (PBDE 209) causes dose-response changes in spontaneous behaviour and cholinergic susceptibility in adult mice. Johansson, N., Viberg, H., Fredriksson, A., Eriksson, P. Neurotoxicology. 2008 Nov. s. 911–919.
75. Toxic effects of brominated flame retardants in man and in wildlife. Darnerud, P. Environment International. 2003 Sep. s. 841–853.
76. Prenatal exposure to PBDEs and neurodevelopment. Environ Health Perspect. Herbstman, J.B., Sjödin, A., Kurzton, M., Lederman, S.A., Jones, R.S., Rauh, V., et al. 2010 May. s. 712–719.

77. PBDE concentrations in women's serum and fecundability. Harley, K.G., Marks, A.R., Chevrier, J., Bradman, A., Sjödin, A., Eskenazi, B. *Environmental Health Perspectives*. 2010 May. s. 699–704.
78. Polybrominated diphenyl ether (PBDE) concentrations in house dust are related to hormone levels in men. Meeker, J.D., Johnson, P.I., Camann, D., Hauser, R. *Science of the Total Environment*. 2009 May. s. 3425–3429.
79. Hormone disruption by PBDEs in adult male sport fish consumers. Turyk, M.E., Persky, V.W., Imm, P., Knobeloch, L., Chatterton, R., Anderson, H.A. *Environmental Health Perspectives*. 2008 Dec. s. 1635–1641.
80. Beveridge & Diamond. Flame Retardants Face Increasing Federal and State Scrutiny. 2014. [WWW]. [Viitattu 25.5.2015]. Saatavilla <http://www.bdlaw.com/news-1623.html>
81. New Thinking on Flame Retardants. Betts, K.S. *Environmental Health Perspectives*. May 2008. s. A210–A213.
82. Handbook of Environmental Degradation of Materials, 2<sup>nd</sup> Edition. Kutz, M. Elsevier 2012. ISBN: 978-1-4377-3455-3
83. Recent developments in fire retardancy of polymers. Dasari, A., Zhong-Zhen Yu, Z.-Z., Cai, G.-P., Mai, Y.-W. *Progress in Polymer Science* 38 (2013). s. 1357–1387
84. Phosphorus flame retardants in thermoset resins. Hörold, S. *Polymer Degradation and Stability* 64 (1999). s. 427–431
85. SFS-EN ISO 10534-1. Akustiikka. Äänen absorptiosuhteen ja impedanssin määrittäminen impedanssiputkillä. Osa 1: seisovan aallon suhdetta käyttävä menetelmä. Suomen standardoimisliitto SFS ry. Helsinki 2001. 29 s.
86. Spectrum and Octave Band. Chan, L. S. A. [WWW]. [Viitattu 30.10.2014]. Saatavissa: <http://moscow.cityu.edu.hk/~bsapplec/spectrum.htm>

## LIITTEET

*Liite 1. Oktaavi- ja kolmannesoktaavikaistojen taajuusalueet. [86]*

1 OCTAVE			$\frac{1}{3}$ OCTAVE		
Lower cutoff frequency (Hz)	Center frequency (Hz)	Upper cutoff frequency (Hz)	Lower cutoff frequency (Hz)	Center frequency (Hz)	Upper cutoff frequency (Hz)
11	16	22	14.1	16	17.8
			17.8	20	22.4
			22.4	25	28.2
22	31.5	44	28.2	31.5	35.5
			35.5	40	44.7
			44.7	50	56.2
44	63	88	56.2	63	70.8
			70.8	80	89.1
			89.1	100	112
88	125	177	112	125	141
			141	160	178
			178	200	224
177	250	355	224	250	282
			282	315	355
			355	400	447
355	500	710	447	500	562
			562	630	708
			708	800	891
710	1,000	1,420	891	1,000	1,122
			1,122	1,250	1,413
			1,413	1,600	1,778
1,420	2,000	2,840	1,778	2,000	2,239
			2,239	2,500	2,818
			2,818	3,150	3,548
2,840	4,000	5,680	3,548	4,000	4,467
			4,467	5,000	5,623
			5,623	6,300	7,079
5,680	8,000	11,360	7,079	8,000	8,913
			8,913	10,000	11,220
			11,220	12,220	14,130
11,360	16,000	22,720	14,130	16,000	17,780
			17,780	20,000	22,390